



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# NÁVRH PŘEDNÍHO DEFORMAČNÍHO ČLENU VOZIDLA FORMULE STUDENT

FORMULA STUDENT IMPACT ATTENUATOR DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL BILÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL RAMÍK

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Michal Bilík

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Návrh předního deformačního členu vozidla Formule Student**

v anglickém jazyce:

#### **Formula Student Impact Attenuator Design**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je návrh vhodné varianty předního deformačního členu vozidla Formule Student vyhovujícího zadaným pravidlům.

Cíle diplomové práce:

1. Proved'te rešerši současného stavu v oblasti ochrany cestujících při nárazech ve vozidle se zaměřením na deformační členy používané u Formule Student.
2. Proved'te zkoušky deformačního chování vzorku materiálu vybraného pro deformační člen.
3. Navrhnete deformační člen pro stávající model studentské formule vyhovujícího pravidlům mezinárodní studentské soutěže.
4. Proved'te počítačovou simulaci napjatosti upevňovací desky deformačního členu.
5. Proved'te zkoušku navrženého deformačního členu předepsanou pravidly a její vyhodnocení.
6. Zhodnoťte dosažené výsledky a vyslovte se k vhodnosti navrženého deformačního členu.

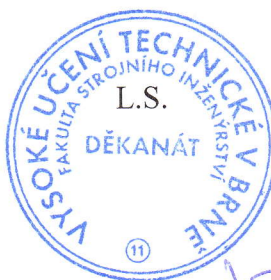
Seznam odborné literatury:

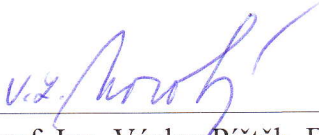
- [1] 2011 Formula SAE Rules [online], 2011, poslední revize 14.10.2011. Dostupné z:  
<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules>
- [2] BORJA S. Behaviour of an Impact Attenuator for Formula SAE Car under Dynamic Loading. International Journal of Vehicle Structures & Systems, 2010, Vol. 2, No. 2, print ISSN 0975-3060, online ISSN 0975-3540
- [3] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. Pružnost a pevnost I, VUT Brno 1992


Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Ramík

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 24.10.2011



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan



## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem deformačního členu pro vozidlo Formule Student. Cílem je vybrat vhodný materiál a prověřit jeho chování při deformaci. Na základě výsledků navrhnout rozměry deformačního členu a poté provést jeho zkoušku. Dále je cílem práce provedení MKP analýzy bezpečnostního plechu a testovacího přípravku.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Formule Student, deformační člen, hliníková pěna, polymerní pěna, voštinové materiály, kvazi-statická zkouška, bezpečnost

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with Formula Student Impact Attenuator design. The aim of the thesis is to select suitable material and put it to the test of deformation. From results to suggest dimensions of Impact Attenuator and then perform its test. Next aim of the thesis is to perform FEM analysis of Anti-Intrusion plate and supporting rack.

## KEYWORDS

Formula Student, Impact Attenuator, aluminium foam, polymer foam, honeycomb materials, quasi-static test, safety



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bílík, M. Návrh *předního deformačního členu vozidla Formule Student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana Ing. Pavla Ramíka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2012

.....

Michal Bilík



## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Ramíkovi za cenné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracovávání mé diplomové práce, ale také za pomoc a ochotu při přípravě a provedení testu deformačního členu.

Velké díky patří také zaměstnancům Leteckého ústavu Ing. Tomáši Uríkovi především za pomoc při přípravě materiálu a provedení zkoušek vzorků, Ing. Petru Augustinovi, Ph.D., za provedení zkoušky deformačního členu a panu doc. Ing. Josefu Klementovi, CSc., za poskytnutí rad a cenných informací.

Dále chci poděkovat všem členům týmu, konkrétně pak kolegům, kteří mi pomohli k realizaci zkoušky: Bc. Ondřeji Bastlovi za pomoc při výrobě přípravku, Bc. Pavlu Ratiborskému a Bc. Pavlu Trněnému za pomoc s přípravou zkušebního stroje.

Chtěl bych také poděkovat všem spolužákům, rodině a známým za obrovskou oporu nejen při tvorbě diplomové práce, ale také v průběhu celého studia.



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Formule Student .....	11
1.1 Soutěžní kategorie.....	11
1.1.1 Třída 1 .....	11
1.1.2 Třída 1A.....	11
1.1.3 Třída 2 .....	11
1.1.4 Třída 2A.....	11
1.2 Základní části soutěže .....	12
1.2.1 Statická část .....	12
1.2.2 Dynamická část.....	12
2 Deformační člen .....	13
2.1 Požadavky na deformační člen .....	13
2.2 Standardní deformační člen .....	16
2.3 Deformační člen Formule Dragon 1 .....	17
2.4 Materiály pro výrobu deformačních členů.....	18
2.4.1 Hliníková pěna.....	18
2.4.2 Polymerní pěny.....	20
2.4.3 Sendvičové voštinové materiály .....	22
2.5 Výpočty nutné k návrhu deformačního členu .....	24
2.5.1 Výpočet maximální síly působící na deformační člen a zkušební vzorek.....	24
2.5.2 Množství absorbované energie během kvazi-statické zkoušky .....	26
2.5.3 Výpočet zpomalení .....	29
2.6 Srovnání a výběr vhodného materiálu pro deformační člen .....	30
2.6.1 Hliníková pěna Alporas .....	30
2.6.2 Absorpční pěna DOW Impaxx™ .....	33
2.6.3 Tvrzená pěna Rohacell© IG71 .....	35
2.6.4 Hliníkový voštinový panel 5M OK8 .....	36
2.6.5 Aramidový voštinový panel C1-4,8-48 .....	37
2.7 Výběr materiálu .....	38
3 Zkoušky vzorků vybraného materiálu a návrh deformačního členu .....	40
3.1 Příprava vzorků a způsob testování .....	40
3.2 Vyhodnocení naměřených dat a určení rozměrů výsledného deformačního členu ...	41
3.2.1 Určení parametrů deformačního členu minimálních rozměrů.....	43
3.2.2 Návrh rozměrů deformačního členu pro vozidlo Formule Student Dragon 2 ....	45
4 Bezpečnostní ochranný plech .....	48





4.1	MKP analýza bezpečnostního plechu .....	48
4.1.1	Postup tvorby MKP analýzy .....	48
4.1.2	Analýza výsledků .....	51
4.1.3	Výroba bezpečnostního ochranného plechu .....	53
5	Přípravek pro testování deformačního členu .....	54
5.1	Návrh přípravku .....	54
5.2	MKP analýza přípravku .....	56
5.3	Výroba přípravku .....	58
6	Zkoušení deformačního členu .....	61
6.1	Sestavení deformačního členu a umístění na přípravek .....	61
6.2	Popis zkušebního zařízení a provedení kvazi-statické zkoušky .....	61
6.3	Vyhodnocení výsledků kvazi-statické zkoušky .....	63
6.4	Porovnání s požadovanými hodnotami a s deformačním členem předchozí Formule Student Dragon 1 .....	66
	Závěr .....	68
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	73
	Seznam příloh .....	75



## ÚVOD

Projekt Formule Student má již dlouholetou tradici po celém světě. Díky tomuto projektu mají studenti technických oborů možnost uplatnit své znalosti a poznatky v praxi při stavbě plně funkčního závodního vozidla a poté se účastnit závodů s dalšími týmy zapojenými do tohoto projektu.

Na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně je projekt Formule Student zaveden již druhým rokem. Stejně jako minulý rok, si i v tomto roce dal tým několika studentů, pod názvem TU Brno Racing, za cíl postavit nové závodní vozidlo. Toto vozidlo bude reprezentovat nejen vysokou školu, ale i schopnosti a dovednosti studentů na závodech v Anglii a v dalších zemích. Snahou celého týmu je tedy postavit nový konkurence schopný vůz Formule Student Dragon 2, jehož základy a získané znalosti se budou opírat o předchozí vozidlo Formule Student Dragon 1.

Do tohoto týmu jsem se rozhodl zapojit i já. Mým úkolem, a tedy i cílem mé diplomové práce, bude navrhnout deformační člen pro vozidlo Formule Student Dragon 2. Konstrukčnímu návrhu bude předcházet výběr a volba nejvhodnějšího materiálu pro absorbování energie při nárazu, dále provedení testů na vzorcích, z nichž posléze navrhnu finální rozměry deformačního členu, který bude splňovat požadavky soutěže. Mým dalším úkolem bude provedení MKP analýzy bezpečnostního ochranného plechu a zkušebního přípravku. V samotném závěru provedu realizaci testu deformačního členu pomocí vhodné metody.

Stejně jako každý člen současného týmu, se budu snažit veškeré návrhy provádět s cílem zlepšení oproti předchozí generaci vozidla. V mém případě se bude jednat o redukci hmotnosti a zmenšení rozměrů deformačního členu za současného dodržení požadavků soutěže.



# 1 FORMULE STUDENT

Formule Student je nejrozšířenější soutěží pro studenty inženýrských škol z celého světa. Původně tato soutěž vznikla v USA v roce 1981 pod názvem Formula SAE (Society of Automotive Engineers - FSAE) a postupem času se rozšířila i do dalších zemí po celém světě. Za zmínku stojí např. soutěž pořádaná v Brazílii, Austrálii nebo v Evropě v zemích, jako jsou Velká Británie (Formula Student - FS), Německo a Itálie. V současné době se závodů Formule Student účastní okolo 300 týmů z celého světa. Jejich úkolem je sestavit tým, který podle daných specifikací navrhne a vyrobí jednomístné závodní vozidlo, které bude dobře ovladatelné, výkonné, spolehlivé, bezpečné, ekologické a také levné. Podle pravidel bude budoucím zákazníkem takového vozu víkendový neprofesionální jezdec autokrosu nebo sprintu. Předpokladem je také výroba 1 000 vozů ročně. [7] [8]

## 1.1 SOUTĚŽNÍ KATEGORIE

Týmy jsou zařazeny do čtyř soutěžních kategorií. V každé se poté mezi sebou utkají v několika disciplínách, kde získávají body. Vítězem se stává tým, který v těchto disciplínách získá největší počet bodů. [7]

### 1.1.1 TŘÍDA 1

Třída 1 je kategorií, v rámci které týmy vyrobí vůz podle daných pravidel a účastní se všech vypsanych disciplín. Body se udělují za prezentaci vozu, technický návrh, marketing, akceleraci, „osmičku“ (skid-pad), nejrychlejší kolo na dráze, ekonomickou jízdu a vytrvalostní závod.

### 1.1.2 TŘÍDA 1A

Pro třídu 1A platí podobná pravidla jako pro třídu 1, ale důraz je kladen na emise oxidu uhličitého během vytrvalostního závodu.

### 1.1.3 TŘÍDA 2

Třída 2 je určena pro týmy, které nepostavily plně funkční vůz. Mohou prezentovat doposud vyrobené díly, design a náklady na výrobu.

### 1.1.4 TŘÍDA 2A

Poslední třída v této soutěži je určena pro nové týmy, které nemají postavený kompletně celý vůz. Důraz se klade na design a přihlíží se také k výsledkům týmů ze stejných univerzit působících v kategoriích (třídách) 1 a 1A.



## 1.2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI SOUTĚŽE

Celá soutěž je rozdělena na dvě základní části. První z nich je statická část a druhá je dynamická. Pro postup do dynamické části musí týmy podstoupit sérii bezpečnostních testů. Za každou část se získávají body, jejichž maximální počet činí 1 000. [7][9]

### 1.2.1 STATICKÁ ČÁST

Statická část se skládá z:

- Hodnocení prezentace vozu 75 bodů
- Hodnocení technického návrhu 150 bodů
- Hodnocení nákladů na výrobu 100 bodů

V této části porotci hodnotí schopnost týmu prodat vůz budoucím investorům, technické zpracování a vizuální podobu vozidla. Hodnotí se také správně zpracovaná kalkulace výrobních nákladů a hodnota vozidla.

### 1.2.2 DYNAMICKÁ ČÁST

K postoupení do této části je potřeba také úspěšně absolvovat bezpečnostní testy, které nemají žádné bodové ohodnocení, ale bez nichž nelze dále pokračovat v soutěži. Jedná se např. o test brzd, náklonovou zkoušku, aj.

Dynamickou část tvoří samotné závody na různých místech závodního okruhu, skládají se z:

- Akcelpace (sprint) 75 bodů
- „Osmička“ (Skid-Pad) 50 bodů
- Nejrychlejší kolo na dráze (Autocross) 150 bodů
- Vyrvalostní závod 300 bodů
- Spotřeba paliva (při vyrvalostním závodě) 100 bodů



## 2 DEFORMAČNÍ ČLEN

Cílem předložené diplomové práce je navrhnout vhodný deformační člen (Impact Attenuator – IA) vozidla Formule Student Dragon 2. Tento člen představuje výrazným bezpečnostní prvek sloužící k ochraně řidiče. Jeho úkolem je během nárazu přeměnit kinetickou energii v deformační práci a zmírnit tak následky vzniklé nehody.

### 2.1 POŽADAVKY NA DEFORMAČNÍ ČLEN

Požadavky na deformační člen pro soutěž Formule Student vychází z původní soutěže Formula SAE a jsou popsány v pravidlech Formula SAE pro rok 2012 v části B, článku 3. [9]

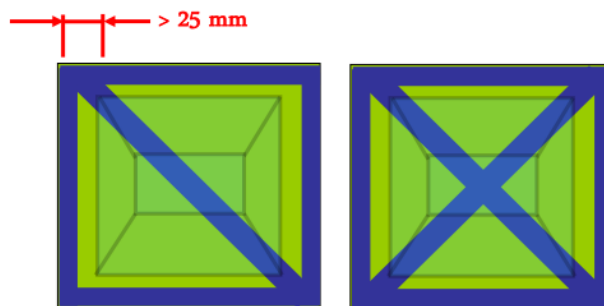
Deformační člen musí být:

- a) připevněn k přední přepážce rámu, tzv. bulkheadu,
- b) nejméně 200 mm dlouhý (měřeno v podélné ose vozidla),
- c) nejméně 100 mm vysoký a 200 mm široký v minimální vzdálenosti 200 mm od přední přepážky,
- d) bezpečně a přímo připevněn k přední přepážce rámu a nesmí být součástí kapotáže,
- e) při nárazu nesmí proniknout přední přepážkou.

Deformační člen a jeho upevnění musí být zkonstruováno tak, aby v případě nárazu mimo osu vozidla přenesl adekvátní silové zatížení.

K přední přepážce rámu se deformační člen připevní pomocí plechu, tzv. Anti-Intrusion plate, který může být ocelový, tloušťky nejméně 1,5 mm a jehož rozměry nejsou menší než obrys středových os profilů přední přepážky. Druhou možností zmiňovanou v pravidlech je použití hliníkového plechu s minimální tloušťkou 4 mm a rozměrech nepřesahujících vnější obrys přední přepážky. Tento plech lze spojit s rámem přivařením nebo přišroubováním minimálně 4 šrouby průměru 8 mm pevnostní třídy 8.8.

V případě, že vzdálenost mezi standardním deformačním členem a vnějšími rozměry přední rámové přepážky překročí hodnotu 25 mm, je nutné doplnit přední rámovou přepážku o diagonální trubky jedním ze způsobů, který je znázorněn na Obr. 1. [20]



Obr. 1 Doplnění přední přepážky o diagonální trubky [20]

Dále jsou v pravidlech pro Formula SAE popsány podmínky pro testování deformačního členu a jakých hodnot musí být dosaženo: [9]

- A) Deformační člen se připevní k objektu, jehož hmotnost je 300 kg a pohybuje se proti pevné bariéře rychlostí 7 m/s.
- B) Průměrné hodnoty zpomalení<sup>1</sup> nesmí přesáhnout 20 násobek hodnoty tíhového zrychlení, tedy 20 krát  $9,81 \text{ m/s}^2$  (viz odstavec 2.5).
- C) Maximální hodnota zpomalení během nárazu nesmí převýšit 40 násobek tíhového zrychlení.
- D) Deformační člen musí absorbovat nejméně 7 350 J energie.
- E) Při testování musí být deformační člen s plechem připevněn k testovacímu přípravku stejným způsobem, jako je připevněn k vozidlu.
- F) Vzdálenost pod bezpečnostním ochranným plechem a pevnými částmi rámu nebo testovacího přípravku musí být alespoň 50 mm.
- G) Trvalá deformace plechu nesmí být větší než 25,1 mm.

Dynamické testování deformačního členu je dovoleno pouze na specializovaném testovacím zařízení, jako jsou nárazové sítě, kyvadla nebo padostroje (Obr. 2). Toto zařízení může být součástí vybavení univerzity a jeho obsluha musí být prováděna odborným pracovníkem. Týmům není z bezpečnostních důvodů dovoleno stavět jejich vlastní zařízení na dynamické testy. Druhou možností ke zjištění požadovaných parametrů deformačního členu je kvazi-statická metoda, o které se dále zmiňují v odstavci 6.2. [9]

<sup>1</sup> Jednotky zpomalení používané v pravidlech soutěže Formule Student [ $\text{g's}$ ] nepatří do soustavy SI. Správně by mělo být pro zpomalení použito jednotky [ $\text{m/s}^2$ ], nicméně v textu budu kvůli kompatibilitě s pravidly nadále používat označení násobku tíhového zrychlení g [nás. g].



*Obr. 2 Padostroj - dynamický test [19]*



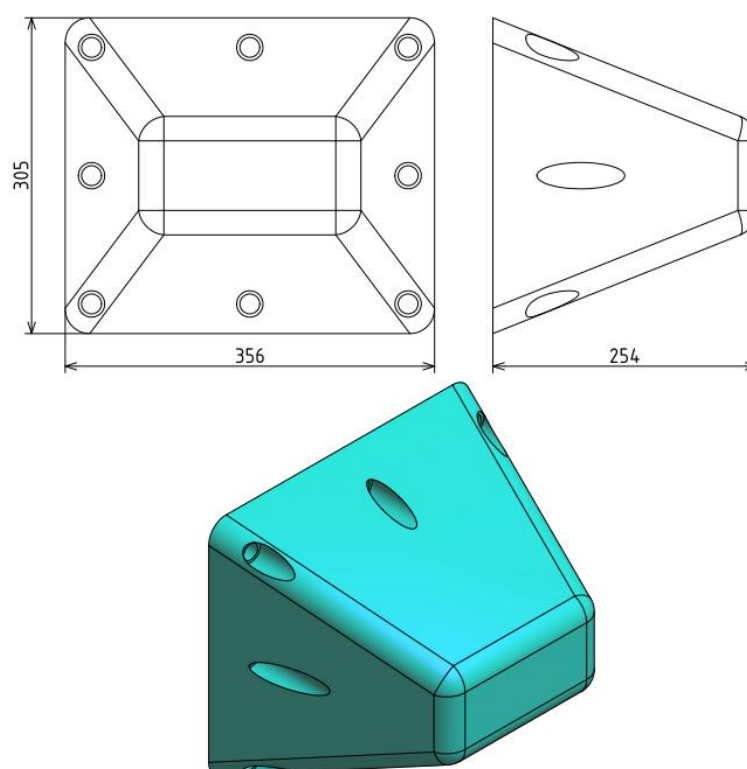
Po provedení testu musí tým do předepsaného termínu odeslat technickou zprávu, tzv. Impact Attenuator Data Report, komisi posuzující typ prováděného testu, výpočty, výsledky a vypracování data reportu. Součástí této zprávy musí být schéma použité metody doplněné o fotografie deformačního členu před a po provedení testu. Testovaný deformační člen musí být také přítomen u komise při závodech pro porovnání s fotografiemi a deformačním členem na vozidle.

Komise uděluje každému týmu výslednou známku charakterizující počet minusových bodů. Tým je také penalizován za nedodržení termínu odeslání data reportu a to v hodnotě odečtu 10 bodů za každý den po uplynutí termínu až do maximálního odpočtu 50 bodů.

## 2.2 STANDARDNÍ DEFORMAČNÍ ČLEN

Všechny týmy mají možnost zakoupení tzv. standardního deformačního členu, Obr. 3. Ten je navržen organizátory soutěže tak, aby splnil veškeré požadavky, které jsou specifikovány v pravidlech. Tento deformační člen je vyroben z materiálu DOW Impaxx<sup>TM</sup> 700, o kterém se zmiňují v odstavcích 2.4.2. a 2.6.2. Při zakoupení tohoto členu se musí přizpůsobit rozměry přední rámové přepážky a kapotáž jeho rozměrům, což by v případě vozu Dragon 2 znamenalo zvětšit rozměry přední rámové přepážky. Veškeré důležité parametry standardního deformačního členu jsou znázorněny v Tab. 1. [20]





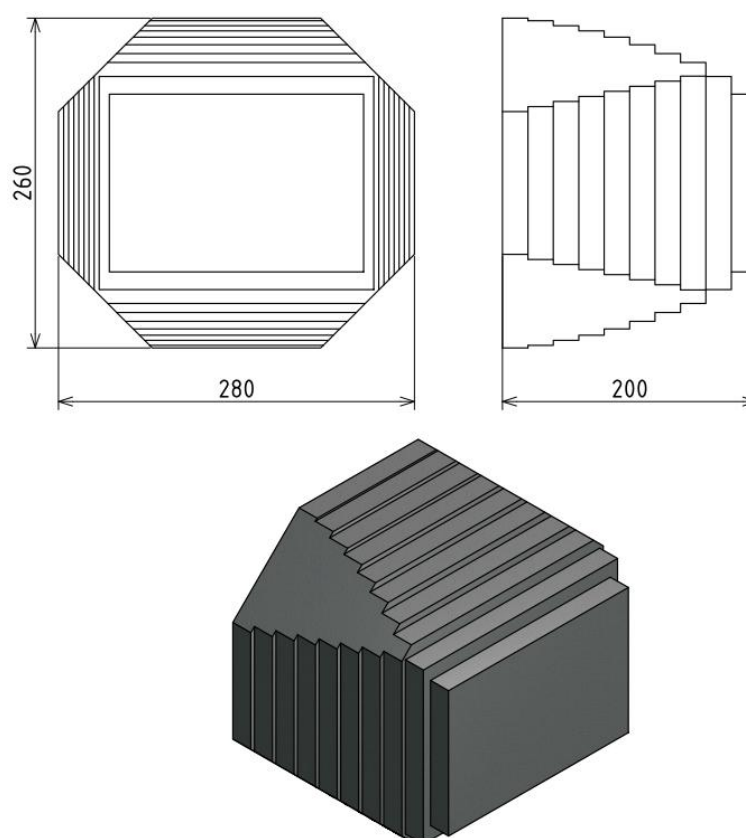
Obr. 3 Standardní deformační člen [20]

Tab. 1 Parametry standardního deformačního členu [20]

Rozměry [mm]	Výška	305
	Šířka	356
	Délka	254
Materiál	DOW Impaxx™ 700	
Hmotnost [kg]	0,6	

### 2.3 DEFORMAČNÍ ČLEN FORMULE DRAGON 1

Na výrobu deformačního členu předchozího vozidla Formule Dragon 1 byla použita deska z hliníkové pěny pod označením Alporas, více informací k tomuto materiálu lze nalézt v odstavcích 2.4.1 a 2.6.1. Tato deska, o výšce 20 mm, se nadělila na požadované rozměry a složením několika vrstev na sebe se vyrobil deformační člen. Z důvodu kolize s kapotáží jej bylo nutné vyrobit v pyramidovém tvaru s úkosey, Obr. 4. Pyramidový tvar se poté projevil na průběhu síly při stlačování a dosažených hodnot pohlcené energie. Rovněž dovolených zpomalení se podařilo docílit, i když na hranici pravidel. Parametry deformačního členu vozidla Dragon 1 jsou zaznamenány v Tab. 2. [5]



Obr. 4 Deformační člen předchozí Formule Student Dragon 1 [5]

Tab. 2 Parametry deformačního členu předchozí Formule Student Dragon 1 [5]

Rozměry [mm]	Výška	260
	Šířka	280
	Délka	200
Materiál	Alporas	
Hmotnost [kg]	2,4	

## 2.4 MATERIÁLY PRO VÝROBU DEFORMAČNÍCH ČLENŮ

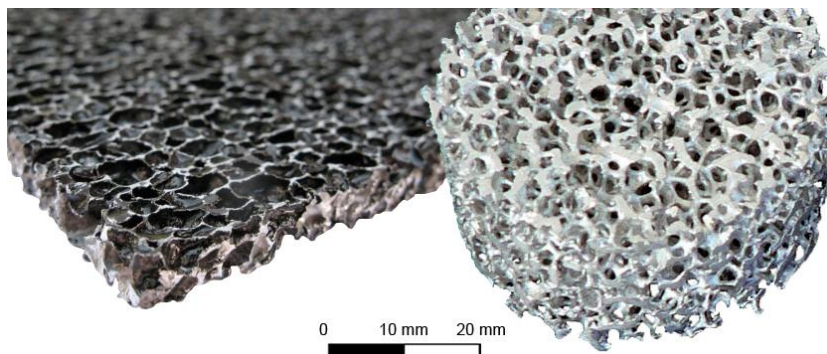
V následujících několika odstavcích se zaměřím na nejčastěji používané materiály pro výrobu deformačních členů vozidel Formule Student. Konkrétně se zaměřím na hliníkové pěny, polymerní pěny a voštinové materiály.

### 2.4.1 HLINÍKOVÁ PĚNA

Součást, vyrobená z hliníkové pěny, dosahuje mnohokrát menší hmotnosti, než stejně velký objekt vyrobený z plného kovu. Tento materiál bychom mohli přirovnat k materiálům

vytvořených přírodou – např. kosti a korály, které se díky své buňkové struktuře vyznačují poměrně vysokou tuhostí. Problém tohoto materiálu spočívá v tom, že pěnový systém představuje nelineární stochastické rozložení materiálu a nelze tedy předvídat jeho chování při různém zatížení. [1]

Hliníková pěna je také vhodný materiál k pohlcení elektromagnetického vlnění. Používá se jako ochrana místností a budov před únikem informací (banky, ministerstva, velké firmy, atp). Dále je vhodná pro absorbování zvukových vln, kdy se energie zvuku díky vysoké pórovitosti mění v teplo. V automobilovém průmyslu se nejčastěji tento materiál používá jako ochranný prvek k absorbování energie nárazu. Pokud je hliníková pěna vystavena tlakovému namáhání přesahující mez pevnosti v tlaku, dojde k deformaci vrstev s buněčnými membránami a tím dochází k pohlcování energie nárazu. [38]

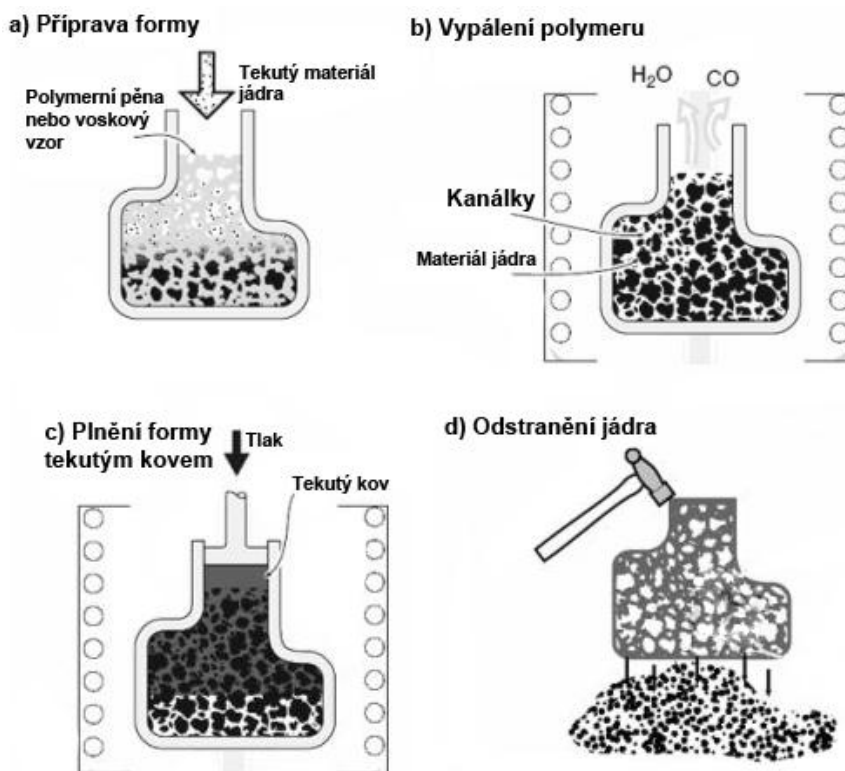


Obr. 5 Hliníková pěna Alporas (vlevo) a Duocel (vpravo) [3] [4]

Hliníkové pěny jsou v současné době známy pod různými obchodními značeními. Nejznámější jsou Alporas a Duocel (Obr. 5), Alulight, Gasar, Metcomb, aj. Jejich výroba probíhá několika technologickými způsoby, kdy dojde k vytvoření bublin v tavenině – k tzv. napěnění. Obr. 6 [21]

#### VÝROBA HLINÍKOVÉ PĚNY DUOCEL ODLÉVÁNÍM, OBR. 6 [21]

- Do formy se vloží polymerní nebo vosková pěna s požadovanou velikostí buněk. Forma se poté vyplní jádrem, které je tvořeno pískem nebo keramickou tekutou hmotou. Tímto se vyplní duté místo ve formě a takto připravená forma se nechá vychladnout.
- Opětovným zahřátím formy se vypálí polymerní pěna nebo vosk. Ve formě zůstanou průchozí místa, kde byl tento materiál, a tím vznikne vzor pro strukturu kovové pěny.
- Roztavený kov se poté nalije pod tlakem do formy a vyplní tak volná místa.
- Keramické nebo pískové jádro se odstraní a zůstane jen kovová pěna s otevřenými buňkami.



Obr. 6 Výroba hliníkové pěny Duocel [21]

## 2.4.2 POLYMERNÍ PĚNY

Polymerní pěny jsou dvoufázové systémy se spojitou termoplastovou nebo reaktoplastovou maticí, která se skládá z 50 až více než 90% plynné fáze. Polymerní pěny jsou fázově heterogenní materiály, a proto jsou považovány za kompozitní systém. Vlastnosti pěn jsou kromě vlastností základní strukturní fáze polymeru ovlivněny objemovým podílem plynu, strukturní charakteristikou, tloušťkou stěny a velikostí buňky. [22]

Důležitou vlastností u těchto pěn je příznivý poměr tlakové pevnosti a hmotnosti, dále pak schopnost absorbovat rázovou energii a tlumit kmity. Stlačení, závislé na materiálu a hustotě buněk, dosahuje poměrně vysokých hodnot: 60-80 %. Polymerní pěny jsou pro svou nízkou hmotnost a dobré tepelné a zvukové izolační vlastnosti vhodné pro výrobu obalových a stavebních izolačních prvků. [23]

Tyto materiály se používají ve všech odvětvích průmyslu, nejčastěji v automobilním a leteckém za účelem snížení hmotnosti, široké uplatnění mají také při stavbě lodí, ve zdravotnictví nebo také ve sportu atp. Jejich použití je však omezeno teplotou a prostředím, ve kterém se používají. [13]



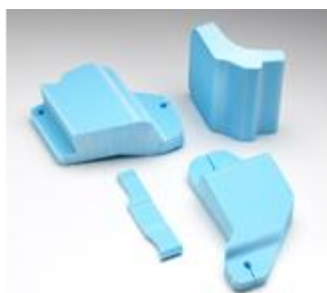
Mezi nejčastěji používané polymery pro výrobu těchto pěn patří: [22] [23] [25]

*a) PVC – polyvinylchlorid*

Nejpoužívanější z termoplastů s relativně nízkou cenou a širokým uplatněním ve všech odvětvích průmyslu. Často se využívá jako jádro v sendvičových konstrukcích. Jedním z představitelů PVC pěny je Airex© R63 [26] nebo Divinycell©.

*b) PS – polystyren*

Polystyrenové pěny se často používají při výrobě plachetnic a surfových prken, ale také jako obalové prvky, tepelně a zvukově izolační desky pro stavebnictví. Své uplatnění našly také v automobilním průmyslu jako pěna DOW Impaxx™, Obr. 7, k absorbování energie při nárazu. Více k tomuto materiálu v odstavci 2.6.2.



*Obr. 7 Výrobek z pěny DOW Impaxx™ [11]*

*c) PMI – polymethacrylimid*

Tvrzená akrylátová pěna prodávána pod označením Rohacell©, Obr. 8, se vyznačuje výbornými mechanickými vlastnostmi, teplotní odolností, odolností vůči různým chemikáliím. Časté využití nachází v leteckém průmyslu jako sendvičový materiál potažený skelnou nebo uhlíkovou tkaninou.



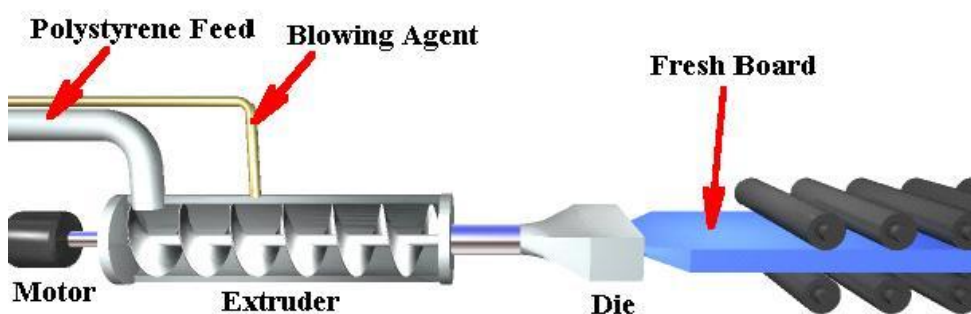
Obr. 8 Výrobek z pěny Rohacell© [27]

d) PET – Polyetylentereftalát

Jedná se o recyklovatelný termoplast, tvarovatelný za tepla. Disponuje dobrými mechanickými vlastnostmi a odolností vůči teplu. Dostupný je například jako Airex© T90. [26]

### VÝROBA XPS PĚNY DOW IMPAXX™

Zkratkou XPS se označuje polystyrén vyráběný protlačováním přes formu – extruded polystyren, Obr. 9. Výroba této pěny probíhá ve dvou fázích. V prvním kroku dojde ve šnekovém dopravníku k plastikaci granulí polystyrénu a za současného sycení zpěňovadlem CO<sub>2</sub> se směs dopravuje směrem k formě. Ve druhé fázi se tavenina na výstupu z dopravníku vlivem změny teploty a tlaku ochlazuje a přes formu je tvarována do podoby desek, které jsou dále kalibrovány na přesné rozměry. [28] [29]



Obr. 9 Výroba polystyrénové pěny DOW Impaxx™ [29]

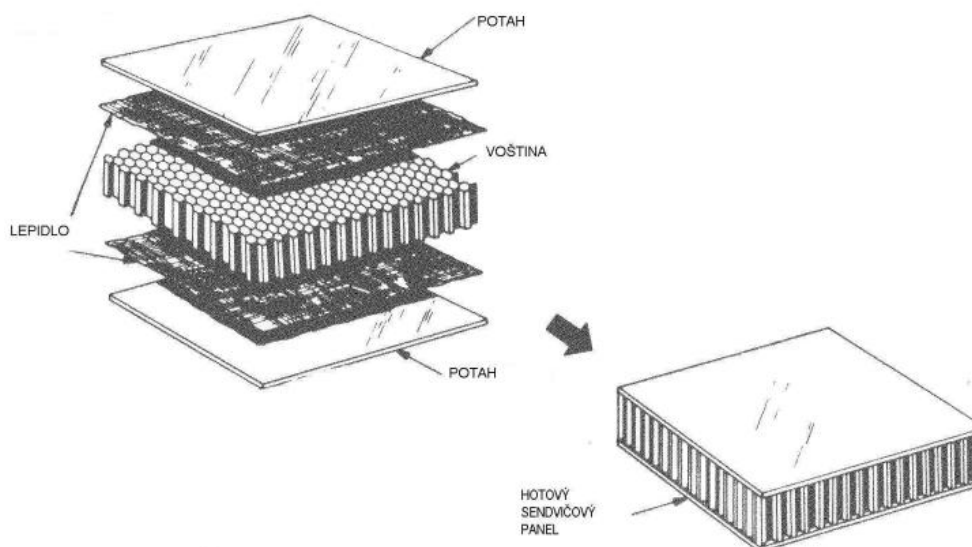
### 2.4.3 SENDVIČOVÉ VOŠTINOVÉ MATERIÁLY

Zvláštním typem kompozitního materiálu jsou tzv. strukturní kompozity, někdy také nazývány jako voštinové (angl. „honeycomb“) sendvičové panely. Jedná se o materiály složené z jádra a potahového materiálu, Obr. 10.

Jádro se vyznačuje nízkou hmotností, což představuje hlavní výhodu sendvičového materiálu. Nejčastěji se používají voštinová jádra vyrobena z tenkých hliníkových plechů (tloušťky

přibližně 0,06 mm), ze skleněných vláken nebo aramidová vlákna slepená fenolovou pryskyřicí (Nomex® a Kevlar®). Buňky voštin se vyrábí v rozměrech od 3 do 19 mm s různou výškou a nejčastěji šestiúhelníkového tvaru. Hustota jádra se pohybuje od 30 do 150 kg/m<sup>3</sup> a pevnost v tlaku od 0,3 do 12 MPa v závislosti na výrobci a materiálu. [31] [32]

Potahový materiál se v případě kovových voštin používá hliníkový, ocelový popř. niklový plech a u vláknových materiálů se volí kompozitový potah ze skelných, aramidových nebo uhlíkových tkanin. [16] [31] [40]



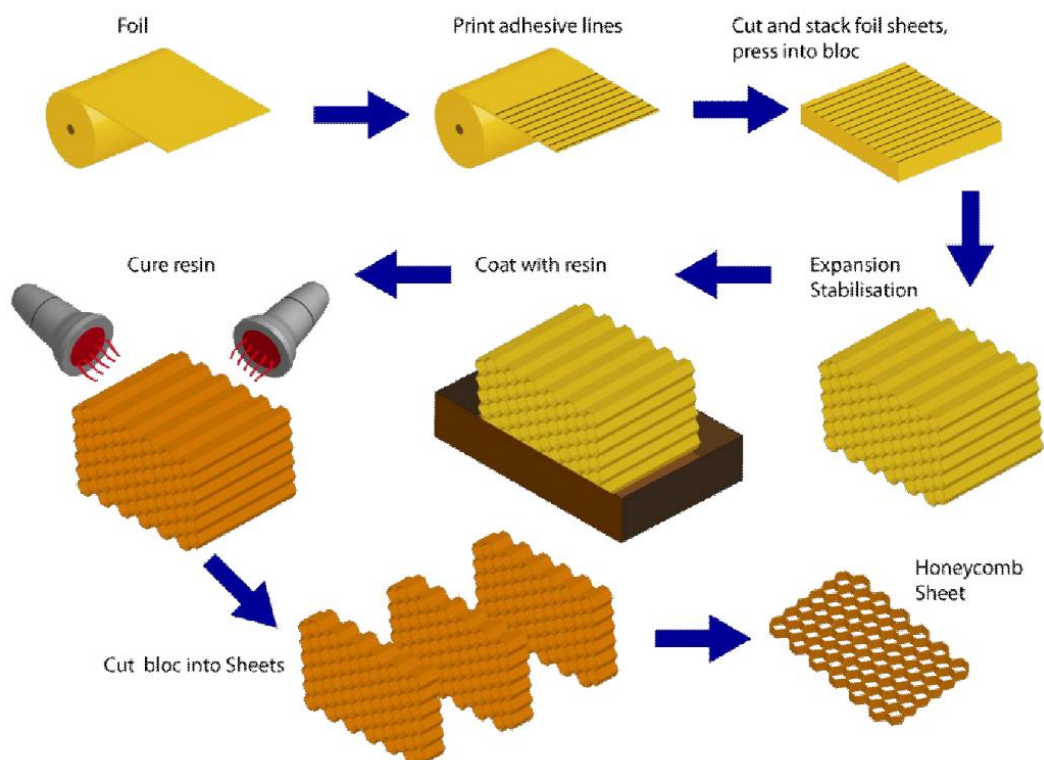
Obr. 10 Struktura sendvičového panelu [16]

Sendvičové prvky vynikají výhodným poměrem pevnostních vlastností k vlastní hmotnosti, čímž nacházejí uplatnění především v leteckém průmyslu, ale také v automobilním, železničním, stavebním a v mnoha dalších. Jeden ze způsobů využití těchto materiálů je uplatnění jejich vysoké schopnosti absorpce mechanické energie při nárazu, čímž jsou obzvláště vhodné pro použití ke zhotovení deformačního členu na vozidle Formule Student.

### VÝROBA VOŠTINOVÝCH PANELŮ

Výroba probíhá několika různými technologiemi, např. pomocí metody tažení. V případě aramidového voštinového panelu je několik vrstev materiálu jádra k sobě přilepeno s určitými rozestupy. Poté se nadělí na požadovanou délku panelu a působením síly kolmé na rovinu, ve které leží spoje, se jednotlivé vrstvy natáhnou. Dojde tak k vytvoření hexagonálního tvaru buněk. Nakonec se jádro nechá obalit vrstvou pryskyřice. V dalším kroku se na voštinové jádro před položením potahu přiloží fólie lepidla, která se při zvýšené teplotě nataví a spojí materiál jádra a potahu k sobě, Obr. 11. [21] [33]





Obr. 11 Výrobní proces aramidové voštiny [33]

## 2.5 VÝPOČTY NUTNÉ K NÁVRHU DEFORMAČNÍHO ČLENU

Při výpočtu budeme vycházet ze základních požadavků na deformační člen dle pravidel, které jsou nezbytné pro výpočet:

- Minimální množství absorbované energie 7 350 J.
- Průměrné zpomalení nesmí přesáhnout 20 násobek tíhového zrychlení g.
- Špičkové zpomalení nesmí být větší než 40 násobek tíhového zrychlení g.

### 2.5.1 VÝPOČET MAXIMÁLNÍ SÍLY PŮSOBÍCÍ NA DEFORMAČNÍ ČLEN A ZKUŠEBNÍ VZOREK

Jedná se o maximální hodnotu síly  $F_{\max}^{\text{IA}}$  a  $F_{\max}^{\text{vzorek}}$ , při které je nutné ukončit zkoušku. Pokud bychom pokračovali ve zkoušce dále, došlo by k nárůstu dovoleného maximálního a průměrného zpomalení a tím pádem by navržený člen nevyhověl požadavkům pravidel.




**MAXIMÁLNÍ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA DEFORMAČNÍ ČLEN  $F_{\max}^{\text{IA}}$** 

$$F_{\max}^{\text{IA}} = m^{\text{vozidla}} \cdot G_{\max} \cdot g \text{ [N]}^2 \quad (1)$$

$$F_{\max}^{\text{IA}} = 300 \cdot 40 \cdot 9,81 = 117\,720 \text{ N}$$

kde

$m^{\text{vozidla}}$	... hmotnost vozidla dle pravidel [kg]
$G_{\max}$	... 40 [nás. g]
$g$	... tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

**MAXIMÁLNÍ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA ZKUŠEBNÍ VZOREK  $F_{\max}^{\text{vzorek}}$** 

Využijeme poměru plochy vzorku a deformačního členu.

$$F_{\max}^{\text{vzorek}} = \frac{S^{\text{vzorek}}}{S^{\text{IA}}} \cdot F_{\max}^{\text{IA}} \text{ [N]} \quad (2)$$

kde

$S^{\text{vzorek}}$	... plocha vzorku [ $\text{m}^2$ ]
$S^{\text{IA}}$	... plocha deformačního členu [ $\text{m}^2$ ]

Plocha vzorku (Obr. 12)

$$S^{\text{vzorek}} = a \cdot b \text{ [m}^2\text{]} \quad (3)$$

kde

$a$	... délka vzorku [m]
$b$	... šířka vzorku [m]

<sup>2</sup> Tvar rovnice vychází z druhého Newtonova pohybového zákona, ale zrychlení (zpomalení) je vzhledem k pravidlům soutěže vyjádřeno násobkem tíhového zrychlení, tedy  $G^* = G \cdot g$



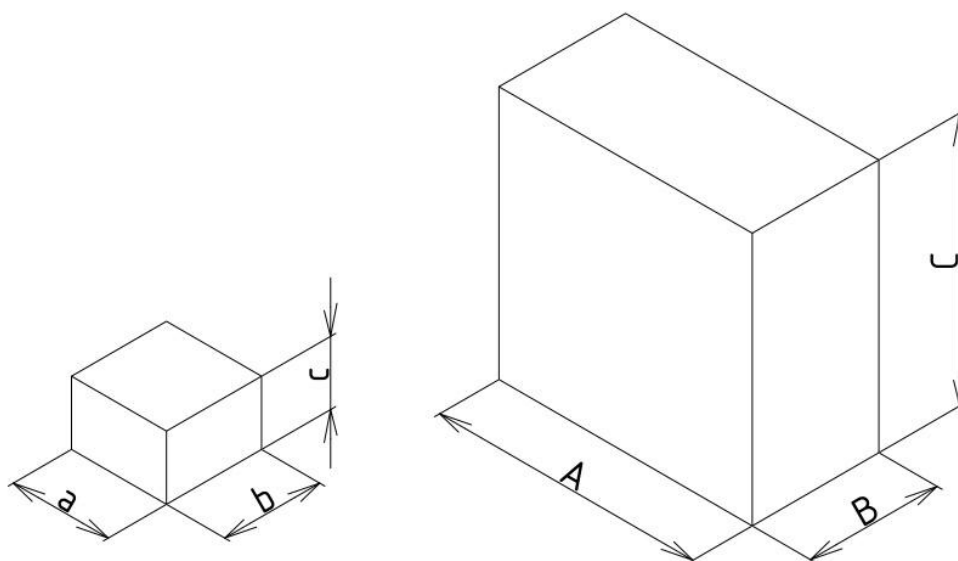
Plocha deformačního členu (Obr. 12)

$$S^{IA} = A \cdot B \text{ [m}^2\text{]} \quad (4)$$

kde

A ... délka členu [m]

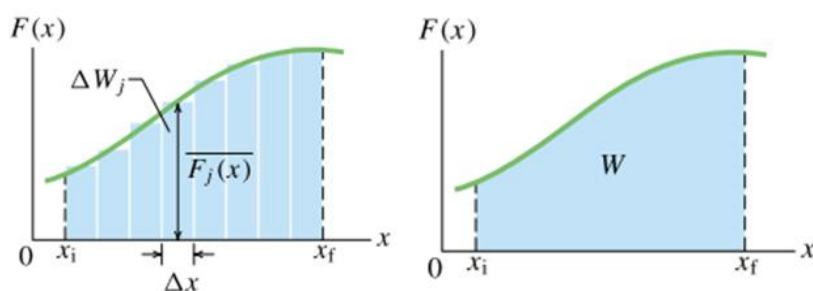
B ... šířka členu [m]



*Obr. 12 Značení rozměrů vzorku a deformačního členu*

### 2.5.2 MNOŽSTVÍ ABSORBOVANÉ ENERGIE BĚHEM KVAZI-STATICKE ZKOUŠKY

Množství absorbované energie během kvazi-statické zkoušky je úměrné práci, kterou vykoná síla při stlačování, Obr. 13. V případě, že síla během stlačování mění svou velikost, musíme použít integrální výpočet práce proměnné síly, viz rovnice (5). Graficky lze tuto závislost chápat jako plochu pod křivkou. [36]



Obr. 13 Obecná závislost velikosti síly působící na částici na poloze (např. při stlačení) [36]

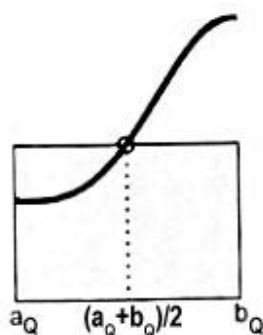
$$W = \int_{x_i}^{x_f} F(x) dx \quad (5)$$

kde

$W$	... práce proměnné síly [J]
$F$	... síla působící na těleso [N]
$x_i$	... poloha na počátku děje [m]
$x_f$	... poloha na konci děje [m]

### PLOCHA POD KŘIVKOU

Pro výpočet plochy pod křivkou je nutné použít numerickou integraci. Hodnotu integrálu lze zjistit pomocí základních kvadraturních formulí jako je např. obdélníková (6). Dostaneme tak obsah obdélníku o stranách délky  $b_Q - a_Q$  a  $f(\frac{a_Q+b_Q}{2})$ , viz Obr. 14. [10]



Obr. 14 Obdélníková formule [10]



$$Q_M(f) = \int_{a_Q}^{b_Q} P_0(x) dx = (b_Q - a_Q) \cdot f\left(\frac{a_Q + b_Q}{2}\right) \quad (6)$$

kde

$Q_M(f)$  ... obdélníková formule  
 $P_0$  ... polynom stupně 0  
 $< a_Q, b_Q >$  ... interval uvažovaných hodnot

#### PŘEPOČET ABSORBOVANÉ ENERGIE ZE ZKUŠEBNÍHO VZORKU NA DEFORMAČNÍ ČLEN:

Využijeme poměr objemů a množství energie absorbované vzorkem:

$$E^{IA} = \frac{V^{IA}}{V^{vzorek}} \cdot E^{vzorek} [J] \quad (7)$$

kde

$E^{IA}$  ... energie absorbovaná deformačním členem [J]  
 $E^{vzorek}$  ... energie absorbovaná zkušebním vzorkem [J]

Objem vzorku (Obr. 12)

$$V^{vzorek} = S^{vzorek} \cdot c [m^3] \quad (8)$$

kde

$S^{vzorek}$  ... plocha vzorku [m<sup>2</sup>]  
 $c$  ... výška vzorku [m]



Objem deformačního členu (Obr. 12)

$$V^{IA} = S^{IA} \cdot C \text{ [m}^3\text{]} \quad (9)$$

kde

$S^{IA}$  ... plocha deformačního členu [m<sup>2</sup>]

$C$  ... výška deformačního členu [m]

### 2.5.3 VÝPOČET ZPOMALENÍ

#### ZPOMALENÍ VOZIDLA S DEFORMAČNÍM ČLENEM

K určení zpomalení působící na vozidlo s deformačním členem vycházíme z tvaru rovnice maximální dovolené síly působící na deformační člen (1), z níž se jednotlivá zpomalení v každém kroku záznamu určí jako:

$$G_i^{IA} = \frac{F_i^{IA}}{g \cdot m^{\text{vozidla}}} \text{ [nás. g]}, \quad (10)$$

kde

$G_i^{IA}$  ... zpomalení působící na deformační člen v jednotlivých krocích měření [nás. g],

$F_i^{IA}$  ... naměřená síla působící na deformační člen v daný okamžik [N],

$m^{\text{vozidla}}$  ... hmotnost vozidla dle pravidel [kg],

$g$  ... tíhové zrychlení [m·s<sup>-2</sup>].

Průměrná hodnota zpomalení je pak dána aritmetickým průměrem jednotlivých dílčích hodnot zpomalení.

$$G_{\text{avg}}^{IA} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n G_i^{IA} \text{ [nás. g]} \quad (11)$$



kde

$G_{avg}^{IA}$  ... průměrná hodnota zpomalení [nás. g]

$G_i^{IA}$  ... zpomalení působící na deformační člen v jednotlivých krocích měření [nás. g]

$n$  ... počet záznamů [-]

Obdobným způsobem, jako v rovnicích (10) a (11), určíme zpomalení objektu v jednotlivých krocích a průměrné zpomalení z  $n$  naměřených hodnot, kterým je zkušební vzorek zatěžován. V těchto rovnicích se vystupuje hmotnost objektu působící na daný předmět. V případě deformačního členu máme dle pravidel určenou hmotnost objektu 300 kg, pro zkušební vzorek je třeba ji určit z rovnice maximální dovolené síly (2) a přitom využít tvaru rovnice (1).

$$m^{vzorek} = \frac{F_{max}^{vzorek}}{G_{max} \cdot g} \text{ [kg]} \quad (12)$$

kde

$m^{vzorek}$  ... hmotnost objektu působící na vzorek [kg]

$F_{max}^{vzorek}$  ... maximální síla působící na vzorek [N]

$g$  ... tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

$G_{max}$  ... 40 [nás. g]

Pomocí všech těchto vztahů můžeme nyní provést porovnání jednotlivých materiálů a později navrhnout tvar a rozměry deformačního členu na vozidlo Formule Student Dragon 2.

## 2.6 SROVNÁNÍ A VÝBĚR VHODNÉHO MATERIÁLU PRO DEFORMAČNÍ ČLEN

Abychom mohli mezi sebou materiály porovnávat, je nutné veškerá získaná data vhodně zpracovat. Tato data aplikujeme na vzorek o rozměrech 75 mm x 75 mm x 20 mm, poté určíme maximální možnou sílu, která na tento vzorek může působit, a následně vypočteme množství absorbované energie a hodnoty zpomalení podle vzorců v předchozím odstavci. Z těchto hodnot jsme poté schopni určit rozměry budoucího deformačního členu a jeho hmotnost.

### 2.6.1 HLINÍKOVÁ PĚNA ALPORAS

Jako zdroj informací o chování tohoto materiálu při deformaci jsem použil data z kvazi-statické zkoušky v tlaku provedené Bc. Pavlem Martincem na vzorcích o rozměrech 75 mm x



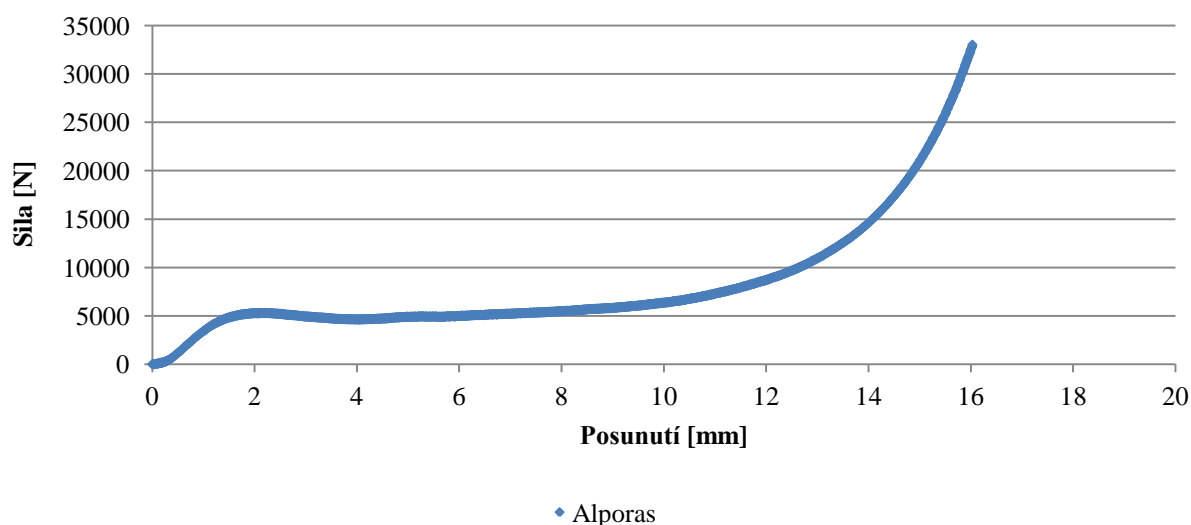
75 mm x 20 mm (viz [5]), Tab. 4, a údaje od výrobce tohoto materiálu, Tab. 3. Navrhované rozměrové řešení je poté uvedeno v Tab. 5.

Z průběhu síly v závislosti na stlačení (Obr. 15) je patrné, že síla začíná poměrně brzy narůstat, přibližně při stlačení na 50 % výšky vzorku. Dochází tak nejenom k růstu absorbované energie, ale také k nárůstu zpomalení. Maximálního dovoleného zpomalení dosáhne již při 80% stlačení. Z tohoto důvodu není možné materiál dále stlačovat. Nicméně vzhledem k již bližšímu prozkoumání chování dalších materiálů, o kterých se zmíním v následujících odstavcích, budu uvažovat dovolené stlačení pouze na 70 % výšky vzorku.

Tab. 3 Technická data Alporas [2]

	Alporas
Hustota	250 kg/m <sup>3</sup>
Pevnost v tlaku	1,5 MPa

## Síla-Posunutí



Obr. 15 Průběh síly v závislosti na stlačení – Alporas. Záznam z průběhu kvazi-statické zkoušky [5]



Tab. 4 Naměřené a vypočtené hodnoty při stlačení vzorku [5]

	Alporas
Síla působící na vzorek $F_{\max}^{\text{vzorek}}$ [N]	14 618,3
Deformace $x^{\text{vzorek}}$ [%]	70,0
Absorbovaná energie $E^{\text{vzorek}}$ [J]	85,0
Průměrné zpomalení $G_{\text{avg}}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	7,3
Maximální zpomalení $G_{\max}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	17,6

Jelikož známe rozměry vzorku a rozměry minimálního deformačního členu dle pravidel, což je 200 mm x 100 mm x 200 mm (význam symbolů viz Obr. 12), můžeme vypočítat jejich objem a na základě poměru těchto objemů určit, jaké množství energie by absorboval člen z tohoto materiálu při dodržení minimálních rozměrů.

#### OBJEM VZORKU

$$V^{\text{vzorek}} = a \cdot b \cdot c = 0,075 \cdot 0,075 \cdot 0,02 = 1,125 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (13)$$

#### OBJEM MINIMÁLNÍHO DEFORMAČNÍHO ČLENU

$$V^{\text{IAmin}} = A \cdot B \cdot C = 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (14)$$

#### MNOŽSTVÍ ABSORBOVANÉ ENERGIE DEFORMAČNÍHO ČLENU S MINIMÁLNÍMI ROZMĚRY

$$E^{\text{IAmin}} = \frac{V^{\text{IAmin}}}{V^{\text{vzorek}}} \cdot E^{\text{vzorek}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1,125 \cdot 10^{-4}} \cdot 85,0 = 3\,022,2 \text{ J} \quad (15)$$

Absorbovaná energie  $E^{\text{IAmin}}$  je oproti požadované energii značně menší. Nyní se pokusíme nalézt takové rozměry deformačního členu, který by absorboval energii 7 350 J.

Rozměry členu A, B zůstanou zachovány, nedojde tak ke změně maximální dovolené síly působící na vzorek a výpočet si zjednodušíme pouze na určení zbývajícího rozměru C, tedy výšky deformačního členu, jakmile hodnota  $E^{\text{IA}}$  dosáhne 7 350 J, výpočet ukončíme. Na základě známé hustoty materiálu a nově vypočteného objemu deformačního členu následně určíme jeho hmotnost podle rovnice:





$$m^{IA} = \rho \cdot V^{IA} \quad (16)$$

$$m^{IA} = 250 \cdot 9,74 \cdot 10^{-3} = 2,435 \text{ kg}$$

kde

$m^{IA}$  ... hmotnost deformačního členu [kg]  
 $\rho$  ... hustota materiálu [kg/m<sup>3</sup>]  
 $V^{IA}$  ... objem deformačního členu dle rozměrů z Tab. 5 [m<sup>3</sup>]

Tab. 5 Návrh řešení Alporas

Rozměry [mm]	A=200
	B=100
	C=487
Objem $V^{IA}$ [m <sup>3</sup> ]	$9,74 \cdot 10^{-3}$
Hmotnost $m^{IA}$ [kg]	2,435

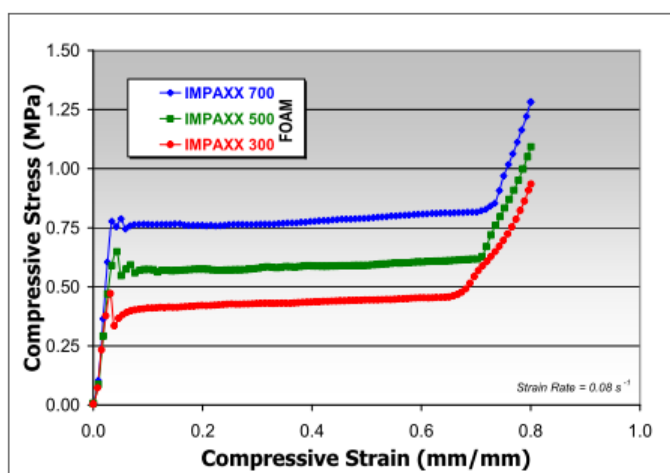
Veškeré výpočty jsou podrobně zaznamenány v příloze P1, kde je aplikuji postupně na další materiály. Získat naměřená data pro každý materiál je poměrně obtížné a zakoupení materiálu pro výrobu zkušebních vzorků, na kterých bych realizoval měření, by bylo časově i finančně náročné. Proto budu hodnoty odečítat z grafů, které jsou k dispozici na webových stránkách výrobců, popř. z grafů získaných z jiných zdrojů. Tento způsob neposkytne tak přesné výsledky, ale pro výběr vhodného materiálu jej lze použít.

## 2.6.2 ABSORPČNÍ PĚNA DOW IMPAXX™

Tuto absorpční pěnu dodává firma DOW Automotive ve třech variantách s vlastnostmi uvedenými v Tab. 6. Z grafu, Obr. 16, jsou dále učeny potřebné hodnoty pro výpočet absorbované energie a zpomalení. Omezující veličinu nevolíme maximální sílu působící na vzorek, ale hodnotu stlačení, po níž je síla přibližně konstantní. Vyhneme se tak jejímu rychlému nárůstu a tedy i nárůstu zpomalení. V této oblasti zátěže materiál již neabsorbuje tolik energie.

Tab. 6 Technická data Impaxx™ [11]

	Impaxx™ 300	Impaxx™ 500	Impaxx™ 700
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	35	43	45
Poměrné stlačení [%]	Napětí v tlaku [MPa]		
10%	0,345	0,512	0,700
25%	0,375	0,544	0,718
50%	0,434	0,612	0,835



Obr. 16 Průběh napětí v závislosti na deformaci – Impaxx™ [11]

Porovnáme-li mezi sebou různé varianty materiálu Impaxx™, dojdeme k závěru, že Impaxx™ 300 a Impaxx™ 500 absorbují při nárazu malé množství energie, délka deformačního členu (hodnota C) by tak mohla dosáhnout až hodnoty 1 440 mm. Řešením by bylo zvětšit šířku a výšku členu, ale i tak bychom museli volit značné rozměry. Tyto varianty tedy nadále nebudeme uvažovat.

Tab. 7 Předpokládané hodnoty při stlačení vzorku v bezpečné oblasti - Impaxx™ 700

	Impaxx™ 700
Síla působící na vzorek $F_{\text{max}}^{\text{vzorek}}$ [N]	4 781,2
Deformace $x^{\text{vzorek}}$ [%]	70,0
Absorbovaná energie $E^{\text{vzorek}}$ [J]	61,3
Průměrné zpomalení $G_{\text{avg}}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	5,2
Maximální zpomalení $G_{\text{max}}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	5,7

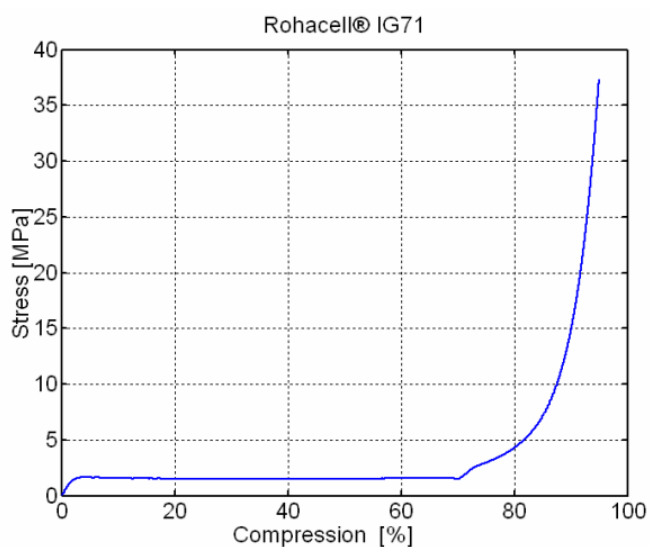


### 2.6.3 TVRZENÁ PĚNA ROHACELL® IG71

Tvrzená pěna Rohacell® IG71 je materiál, u něhož lze taktéž předpokládat konstantní průběh síly až do stlačení přibližně 70 %. Abychom se vyhnuli rychlému nárůstu zpomalení, budeme opět uvažovat bezpečnou oblast stlačování, což je 70 % výšky vzorku. Vypočtené hodnoty na základě údajů z grafu, Obr. 17, jsou zobrazeny v Tab. 9.

Tab. 8 Technická data Rohacell® IG71 [13]

	Rohacell® IG71
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	75
Pevnost v tlaku [MPa]	1,5



Obr. 17 Průběh napětí v závislosti na deformaci - Rohacell® IG71 [12]

Tab. 9 Předpokládané hodnoty při stlačení vzorku v bezpečné oblasti - Rohacell® IG71

	Rohacell® IG71
Síla působící na vzorek $F_{\text{max}}^{\text{vzorek}}$ [N]	9 562,5
Deformace $x^{\text{vzorek}}$ [%]	70,0
Absorbovaná energie $E^{\text{vzorek}}$ [J]	137,1
Průměrné zpomalení $G_{\text{avg}}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	10,3
Maximální zpomalení $G_{\text{max}}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	11,5



Tuto tvrzenou pěnu lze také zakoupit s hustotou  $110 \text{ kg/m}^3$  pod označením Rohacell© IG110. Stejně jako u předchozích materiálů se i zde s rostoucí hustotou zvětšuje pevnost v tlaku, která má zásadní vliv na hodnoty zpomalení. Nyní můžeme na základě výpočtů uvedených v příloze P1 konstatovat, že pro materiály s konstantní hodnotou tlaku při deformaci lze uvažovat pouze ty, jejichž střední deformační pevnost nepřesáhne přibližně 2,8 MPa.

Rohacell© IG110 dosahuje vlivem vysoké pevnosti tlaku [13] průměrné hodnoty zpomalení vyšší, než jakou dovolují pravidla. Proto materiál Rohacell© s touto hustotou nebudeme dále uvažovat.

#### 2.6.4 HLINÍKOVÝ VOŠTINOVÝ PANEL 5M OK8

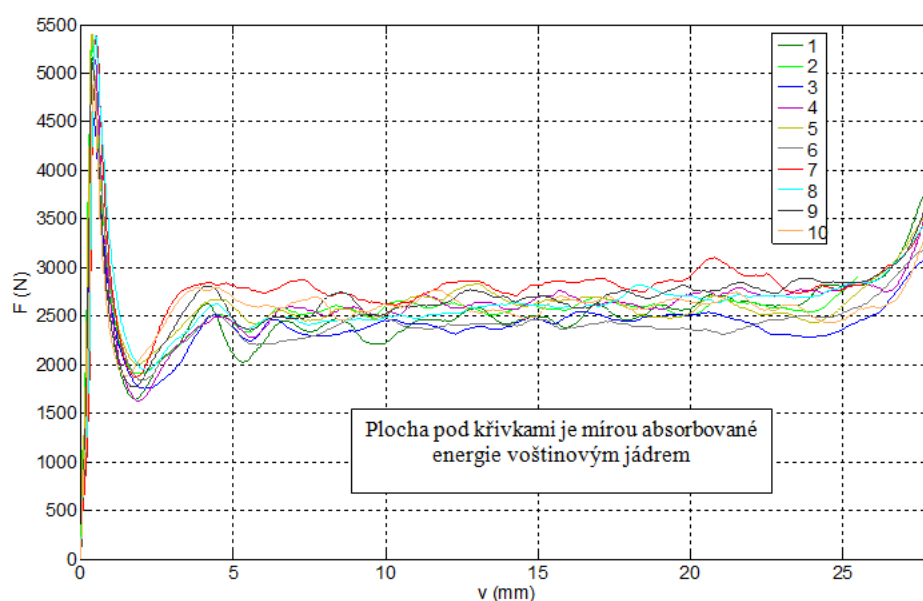
Celohliníkové voštinové sendviče se vyrábí v různých variantách, jejichž vlastnosti jsou převážně určeny velikostí ok. Při výběru hliníkového sendviče je třeba brát v potaz potahový plech a jeho tloušťku. Pokud by byl deformační člen složen z několika vrstev panelů, došlo by vlivem potahu k nárůstu jeho hmotnosti a také délky.

Na počátku stlačování, Obr. 18<sup>3</sup>, materiál dosáhne předepsané pevnosti v tlaku a po překonání vzpěrné pevnosti buněk dojde k poklesu tohoto napětí přibližně na polovinu pevnosti v tlaku udávané výrobcem. Dále následuje borcení buněk při síle kolísající kolem konstantní hodnoty, tzv. síle střední deformační pevnosti, a to až do 70 % stlačení materiálu. Při návrhu je třeba brát v potaz pevnost materiálu v tlaku, abychom nepřekročili maximální dovolené zpomalení. Zároveň musíme vybrat takový materiál, při kterém deformační pevnost dosáhne hodnoty, na základě níž dojde k absorpci dostatečného množství energie. Ke srovnání byl použit materiál od firmy 5M s.r.o. s označením OK8 s vlastnostmi uvedenými v Tab. 10.

Tab. 10 Technická data 5M OK8 [16]

	5M OK8
Velikost buňky [mm]	8
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	64,26
Pevnost v tlaku [MPa]	2,00

<sup>3</sup> Nebylo známo přesné označení materiálu hliníkového voštinového panelu, pouze rozměry zkušební vzorku.



Obr. 18 Průběh síly v závislosti na stlačení vzorku – hliníková voština s rozměry 76 mm x 76 mm x 40 mm [15]

Tab. 11 Předpokládané hodnoty při stlačení vzorku v bezpečné oblasti – 5M OK8

	5M OK8
Síla působící na vzorek $F_{\max}^{\text{vzorek}}$ [N]	22 500,0
Deformace $x^{\text{vzorek}}$ [%]	70,0
Absorbovaná energie $E^{\text{vzorek}}$ [J]	192,3
Průměrné zpomalení $G_{\text{avg}}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	15,1
Maximální zpomalení $G_{\max}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	27,1

### 2.6.5 ARAMIDOVÝ VOŠTINOVÝ PANEL C1-4,8-48

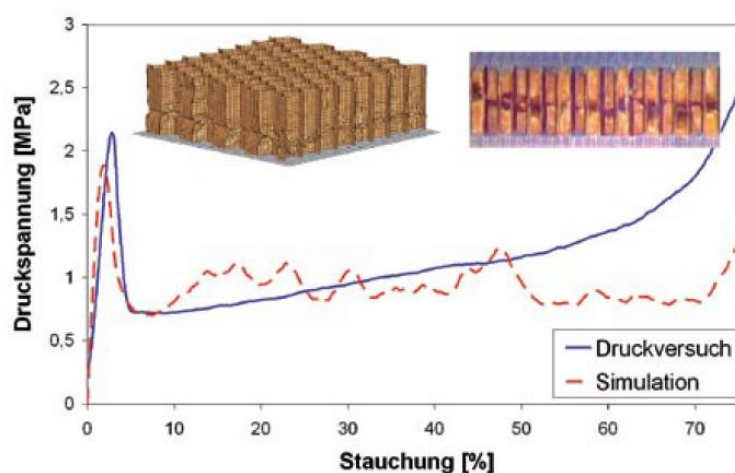
Aramidový voštinový panel se podobně jako hliníkový nabízí v několika variantách. Jeho pevnost v tlaku je také závislá na velikosti buněk. Potahový materiál není z hliníkového plechu, ale z kompozitního materiálu. Nárůst hmotnosti, jako je tomu u hliníkových voštin, není tedy tak znatelný a můžeme jej zanedbat. Silový průběh při stlačování aramidové voštiny můžeme očekávat opět konstantní, popř. s pozvolným růstem, Obr. 19<sup>4</sup>.

K porovnání byl použit voštinový panel s označením C1-4,8-48, jehož technické údaje jsou popsány v Tab. 12 a předpokládané hodnoty při stlačování pak v Tab. 13.

<sup>4</sup> Průběh napětí a deformace panelu z aramidové voštiny bez bližší specifikace.

Tab. 12 Technická data C1-4,8-48 [18]

	C1-4,8-48
Velikost buňky [mm]	4,8
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	48
Pevnost v tlaku [MPa]	2,3



Obr. 19 Průběh napětí v závislosti na deformaci - aramidový voštinový panel [39]

Tab. 13 Předpokládané hodnoty při stlačení vzorku v bezpečné oblasti – C1-4,8-48

	C1-4,8-48
Síla působící na vzorek $F_{\text{max}}^{\text{vzorek}}$ [N]	28 125,0
Deformace $x^{\text{vzorek}}$ [%]	70,0
Absorbovaná energie $E^{\text{vzorek}}$ [J]	148,0
Průměrné zpomalení $G_{\text{avg}}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	12,6
Maximální zpomalení $G_{\text{max}}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	33,9

## 2.7 VÝBĚR MATERIÁLU

Deformační člen vyrobený z hliníkové pěny Alporas dosahuje poměrně vysoké hmotnosti vlivem vyšší hustoty tohoto materiálu. Zásadním nedostatkem všech hliníkových pěn je fakt, že síla během stlačování není konstantní, ale postupně narůstá. O tomto problému se zmiňuji v odstavci 2.6.1. Toto řešení bylo použito u předchozí verze Formule Dragon 1. Mým úkolem bylo nalézt takový materiál, z něhož bude možné vyrobit deformační člen blížíící se minimálním rozměrům a který bude mít nižší hmotnost než ten stávající.



Při výrobě deformačního členu z DOW Impaxx™ 700 docílíme snížení hmotnosti díky nižší hustotě materiálu. Ale jelikož se pěna nedodává s vyšší pevností v tlaku, museli bychom navrhnout deformační člen s většími rozměry, které by se blížily těm, které má standardně dodávaný člen od FSAE, více v odstavci 2.2.

Tvrzená pěna Rohacell© IG71 je materiál, který by mohl sloužit jako náhrada za hliníkovou pěnu. Rozměrově bychom mohli vyrobit deformační člen menších rozměrů a hmotnost by byla přibližně o 1 kg nižší. Lepších výsledků bychom také docílili v oblasti zpomalení, protože tato tvrzená pěna si udržuje ve srovnání s hliníkovou pěnou konstantní průběh síly během stlačování až do 70 %.

Nejvíce se minimálním rozměrům přibližují deformační členy zhotovené z voštinových materiálů. Dosahují také nejnižších hmotností. Stejně jako u většiny předchozích materiálů má síla při stlačování konstantní průběh. Jelikož se hliníkové voštiny nejčastěji dodávají jako panely s potahovými plechy, je nutné k vypočtené hmotnosti přičíst i hmotnost potahových plechů, která není zanedbatelná. Při požadavku na výrobu deformačního členu s nejmenšími rozměry by bylo vhodné použít hliníkovou voštinu. Naopak pro výrobu členu s nejmenší hmotností je vhodný panel z aramidových vláken. Rozhodl jsem se zvolit aramidový voštinový panel C1-4,8-48 a vyrobit tak deformační člen a co nejnižší hmotností.

V Tab. 14 uvádím celkové zhodnocení materiálů, jejich předpokládané rozměry a hmotnosti, kterých bychom mohli docílit při jejich použití.

Tab. 14 Celkové zhodnocení materiálů

		Materiál				
		Alporas	DOW Impaxx™ 700	Rohacell© IG71	5M OK8	C1-4,8-48
Rozměry členu [mm]	A	200	200	200	200	200
	B	100	100	100	100	100
	C	487	675	302	215	280
Objem $V^{IA}$ [m <sup>3</sup> ]		0,0097	0,0135	0,0060	0,0043	0,0056
Hmotnost $m^{IA}$ [kg]		2,435	0,607	0,453	0,276 <sup>5</sup>	0,268

<sup>5</sup> Hmotnost bez potahového plechu.



### 3 ZKOUŠKY VZORKŮ VYBRANÉHO MATERIÁLU A NÁVRH DEFORMAČNÍHO ČLENU

Ke správnému navržení rozměrů deformačního členu je třeba podrobit zkušební vzorky materiálu kvazi-statické zkoušce v tlaku. Poté na základě naměřených dat můžeme navrhnout rozměry deformačního členu tak, aby absorboval požadované množství energie a aby dovolená zpomalení nepřesáhla maximální povolené hodnoty dané pravidly soutěže.

#### 3.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ A ZPŮSOB TESTOVÁNÍ

Námi požadovaný voštinový materiál s výškou jádra 50 mm a rozměry 1 000 mm x 1 000 mm jsme měli možnost zakoupit u dodavatele s poměrně krátkou dodací lhůtou. Nevýhodou byl fakt, že se nejednalo o voštinový panel, ale pouze o jádro. I přes to jsme se rozhodli ke koupi a spolu s pracovníky Leteckého ústavu jsme provedli potažení jádra voštiny, tzv. stabilizaci, skelnou tkaninou pomocí technologie vakuování, Obr. 20.



*Obr. 20 Stabilizace jádra voštiny skelnou tkaninou*

V další fázi jsem připravil několik vzorků o rozměrech 75 mm x 75 mm s výškou 50 mm a provedl sérii zkoušek, Obr. 21. Měření probíhalo na zkušebním stroji INSTRON, Obr. 22, rychlostí stlačování 5 mm/min. Síla byla měřena pomocí siloměru zkušebního stroje a posunutí voštiny při deformaci se určovalo pomocí snímače na základě pohybu příčnicku. Při měření se vyhodnocovala hodnota deformační síly potřebné k borcení buněk. Průběh testování, tedy průběh síly v závislosti na stlačování vzorku, byl automaticky zapisován záznamovým zařízením do prostředí programu LabVIEW a odtud následně exportován do textového souboru k dalšímu zpracování.





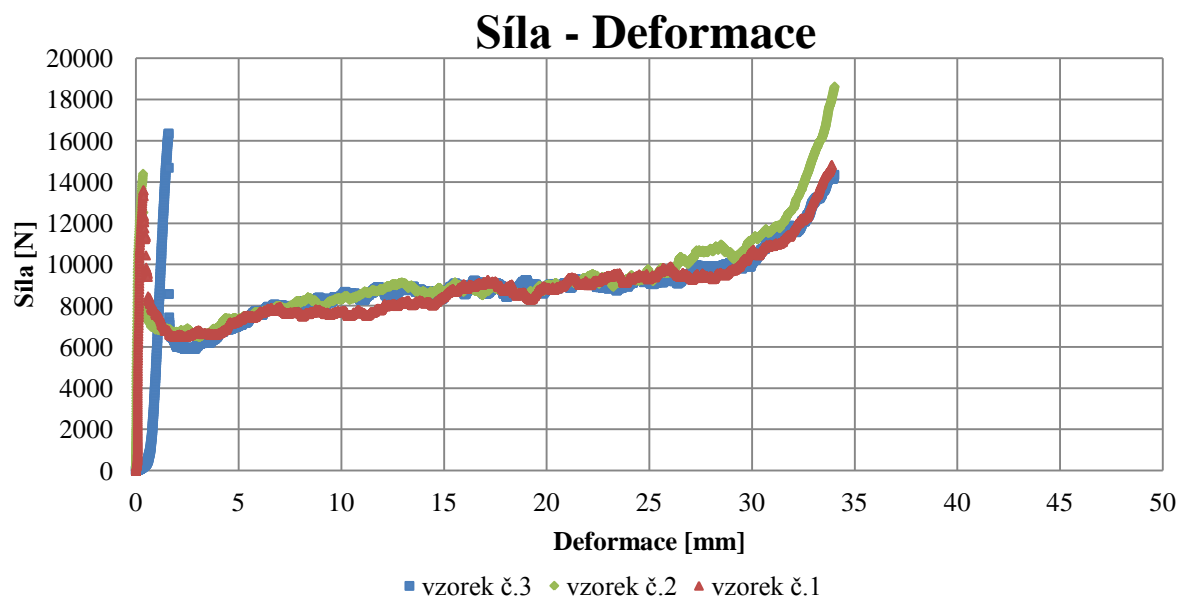
*Obr. 21 Vzorky rozměru 75 mm x 75 mm x 50 mm aramidového voštinového panelu po stlačení*



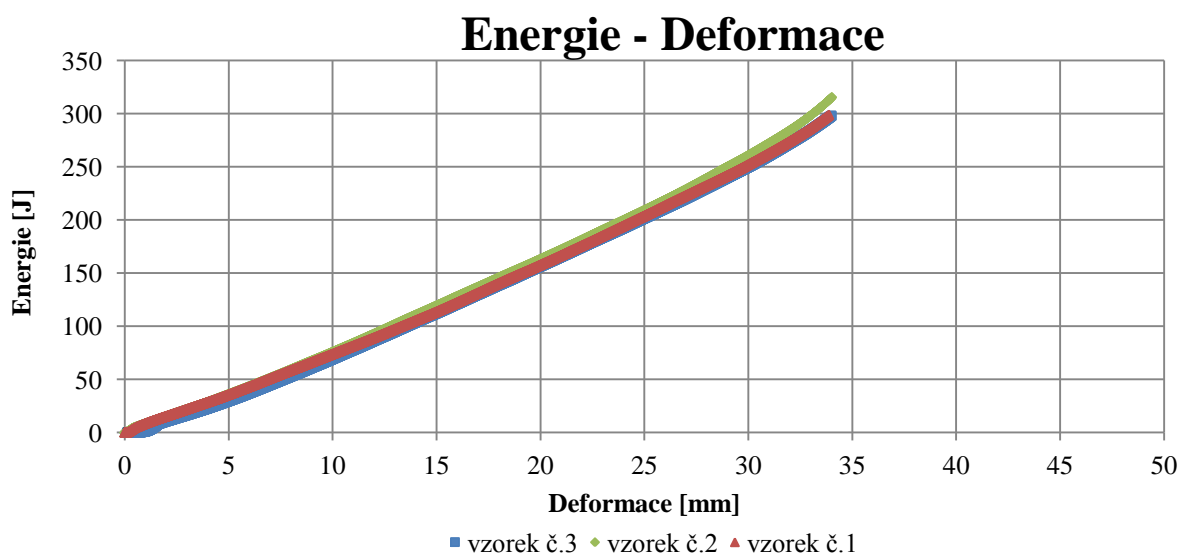
*Obr. 22 Zkušební stroj INSTRON*

### **3.2 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT A URČENÍ ROZMĚRŮ VÝSLEDNÉHO DEFORMAČNÍHO ČLENU**

Z naměřených dat zkušebního vzorku jsem sestrojil v tabulkovém procesoru MS Excel graf průběhu síly při stlačování a pomocí rovnic z odstavce 2.5 jsem určil numerickou integrací podle vztahu (6) míru absorbované energie voštinovým jádrem. V poslední fázi jsem určil zbývající potřebné parametry, jako jsou průměrné a maximální zpomalení. Výsledné grafy průběhu síly a absorbované energii jsou zaznamenány na Obr. 23 a Obr. 24, všechny výpočty spolu s příslušnými grafy pak v příloze P2.



Obr. 23 Změřená závislost síly na stlačení zkušebních vzorků



Obr. 24 Závislost deformační energie na posunutí zkušebních vzorků

Nyní obdobným způsobem, jako jsem určoval rozměry deformačních členů v odstavci 2.6, provedu návrhový výpočet pro deformační člen základních rozměrů, popř. provedu návrh takových rozměrů, aby člen vyhovoval pravidlům soutěže. V následující Tab. 15 jsou uvedeny naměřené a vypočtené průměrné hodnoty ze tří zkušebních vzorků při stlačení.



Tab. 15 Data zkušebních vzorků (hodnoty určeny z měření na třech vzorcích)

Maximální síla působící na vzorek $F_{\max}^{\text{vzorek}}$ [N]	15 016,3
Průměrná síla působící na vzorek $F_{\text{avg}}^{\text{vzorek}}$ [N]	8 811,4
Deformace $x^{\text{vzorek}}$ [%]	67,9
Absorbovaná energie $E^{\text{vzorek}}$ [J]	304,1
Průměrné zpomalení $G_{\text{avg}}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	10,6
Maximální zpomalení $G_{\max}^{\text{vzorek}}$ [nás. g]	20,1

**3.2.1 URČENÍ PARAMETRŮ DEFORMAČNÍHO ČLENU MINIMÁLNÍCH ROZMĚRŮ**

Výše naměřená data ze zkušebních vzorků nyní aplikuji na deformační člen o minimálních rozměrech, přičemž budu používat již zmíněné rovnice z odstavce 2.5. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 16.

**MINIMÁLNÍ ROZMĚRY DEFORMAČNÍHO ČLENU**

délka  $A = 200 \text{ mm}$

šířka  $B = 100 \text{ mm}$

výška  $C = 200 \text{ mm}$

**PŘEPOČET ABSORBOVANÉ ENERGIE ZE ZKUŠEBNÍHO VZORKU NA DEFORMAČNÍ ČLEN DLE ROVNICE (7):**

Objem vzorku

$$V^{\text{vzorek}} = a \cdot b \cdot c = 0,075 \cdot 0,075 \cdot 0,05 = 2,812 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (17)$$

Objem deformačního členu

$$V^{\text{IAmin}} = A \cdot B \cdot C = 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (18)$$



### Absorbovaná energie

$$E^{IAmin} = \frac{V^{IAmin}}{V_{vzorek}} \cdot E_{vzorek} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2,812 \cdot 10^{-4}} \cdot 304,1 = 4\,324,9 \text{ J} \quad (19)$$

## **PRŮMĚRNÉ A MAXIMÁLNÍ ZPOMALENÍ VOZIDLA S DEFORMAČNÍM ČLENEM**

### Plocha vzorku

$$S_{vzorek} = a \cdot b = 0,075 \cdot 0,075 = 5,625 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (20)$$

### Plocha deformačního členu

$$S^{IAmin} = A \cdot B = 0,2 \cdot 0,1 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \quad (21)$$

### Maximální síla působící na deformační člen

$$F_{max}^{IAmin} = \frac{S^{IAmin}}{S_{vzorek}} \cdot F_{max}^{vzorek} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{5,625 \cdot 10^{-3}} \cdot 15016,3 = 53\,391,2 \text{ N} \quad (22)$$

### Průměrná síla působící na člen

$$F_{avg}^{IAmin} = \frac{S^{IAmin}}{S_{vzorek}} \cdot F_{avg}^{vzorek} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{5,625 \cdot 10^{-3}} \cdot 8811,4 = 31\,329,4 \text{ N} \quad (23)$$

### Maximální zpomalení

$$G_{max}^{IAmin} = \frac{F_{max}^{IAmin}}{g \cdot m_{vozidla}} = \frac{53391,2}{9,81 \cdot 300} = 18,1 \text{ nás. g} \quad (24)$$

### Průměrná hodnota zpomalení

$$G_{avg}^{IAmin} = \frac{F_{avg}^{IAmin}}{g \cdot m_{vozidla}} = \frac{31329,4}{9,81 \cdot 300} = 10,6 \text{ nás. g} \quad (25)$$



Tab. 16 Předpokládané hodnoty deformačního členu minimálních rozměrů

Maximální síla působící na člen $F_{\max}^{IAmin}$ [N]	53 391,2
Průměrná síla působící na člen $F_{avg}^{IAmin}$ [N]	31 329,4
Deformace $x^{IAmin}$ [%]	67,9
Absorbovaná energie $E^{IAmin}$ [J]	4 324,9
Průměrné zpomalení $G_{avg}^{IAmin}$ [nás. g]	10,6
Maximální zpomalení $G_{\max}^{IAmin}$ [nás. g]	18,1

### 3.2.2 NÁVRH ROZMĚRŮ DEFORMAČNÍHO ČLENU PRO VOZIDLO FORMULE STUDENT DRAGON 2

Z předešlých výsledků je patrné, že deformační člen vyrobený v základních rozměrech by nesplnil pravidla soutěže, protože hodnota pohlcené energie je nižší. V programu MS Excel jsem tedy sestrojil vzorec, na základě kterého se mi podařilo nalézt takové rozměry deformačního členu, který by vyhověl pravidlům.

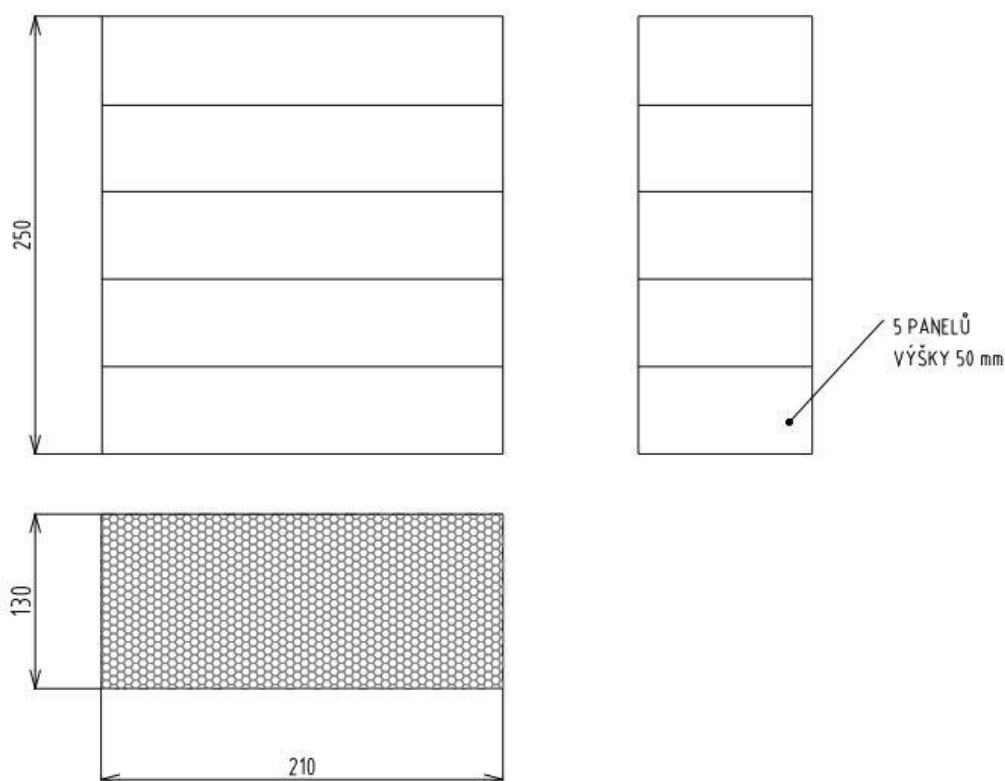
Po konzultaci s designérem kapotáže jsem zvětšil výšku (hodnota v podélné ose vozidla) z původních 200 mm na 250 mm. Docílíme tak zvětšení množství absorbované energie, aniž bychom ovlivnili hodnoty průměrných a maximálních zpomalení. Bohužel tato úprava nebyla dostačující a musel jsem zvětšit i zbývající rozměry. Výpočty jsou totožné jako při určení parametrů pro deformační člen minimálních rozměrů v odstavci 3.2.1, proto v Tab. 17 uvádím pouze výsledné hodnoty.

#### ROZMĚRY DEFORMAČNÍHO ČLENU FORMULE STUDENT DRAGON 2, OBR. 25

délka  $A = 210$  mm

šířka  $B = 130$  mm

výška  $C = 250$  mm



Obr. 25 Rozměry deformačního členu FS Dragon 2

Tab. 17 Předpokládané hodnoty deformačního členu Formule Student Dragon 2

Maximální síla působící na člen $F_{\max}^{\text{IA}}$ [N]	72 879,0
Průměrná síla působící na člen $F_{\text{avg}}^{\text{IA}}$ [N]	42 764,7
Deformace $x^{\text{IA}}$ [%]	67,9
Absorbovaná energie $E^{\text{IA}}$ [J]	7 380,1
Průměrné zpomalení $G_{\text{avg}}^{\text{IA}}$ [nás. g]	14,5
Maximální zpomalení $G_{\max}^{\text{IAmin}}$ [nás. g]	24,7

V tuto chvíli můžeme vyhodnotit obě uvažované rozměrové varianty. V Tab. 18 je přehledně zaznamenáno, které požadavky každá z variant splňuje, popř. nesplňuje. Nyní můžeme realizovat navržený deformační člen pro vozidlo Formule Student Dragon 2 a podrobit jej kvazi-statické zkoušce v tlaku.



Tab. 18 Splnění požadavků soutěže

	Požadavek			
	Dodržení min. rozměrů 200 mm x 100 mm x 200 mm	Min. absorpce energie 7 350 J	Průměrné zpomalení max. 20 (v nás. g)	Maximální zpomalení 40 (v nás. g)
Člen min. rozměrů	✓	✗	✓	✓
Navržený člen pro Formuli Student Dragon 2	✓	✓	✓	✓



## 4 BEZPEČNOSTNÍ OCHRANNÝ PLECH

Bezpečnostní ochranný plech je část přední přepážky rámu vozidla formule student, která má za úkol chránit nohy řidiče proti proniknutí cizího tělesa. Dle pravidel může být vyroben z ocelového plechu tloušťky nejméně 1,5 mm popř. hliníkového plechu tloušťky nejméně 4 mm.

S ohledem na vysoké zatížení, požadavek nízké hmotnosti a vhodné mechanické vlastnosti, Tab. 19, proto volím plech ze slitiny hliníku EN AW-7075 T651. Dalším kritériem pro volbu hliníkového plechu byl i fakt, že hliníkový plech lze zakoupit u většiny oslovených dodavatelů přímo v požadovaných rozměrech, zatímco v případě ocelového plechu bychom museli objednat celou tabuli.

Tab. 19 Vlastnosti hliníkového plechu [35]

	EN AW-7075 T651
$R_{p0,2}$ [MPa]	475
$R_m$ [MPa]	545
HBW	163
$E$ [MPa]	72 000
$\mu$ [-]	0,33
$A_{50mm}$ [%]	8

### 4.1 MKP ANALÝZA BEZPEČNOSTNÍHO PLECHU

Bezpečnostní plech, neboli Anti-Intrusion plate, je součást vystavená při nárazu vysokému zatížení. Řešení tedy nepředpokládám v oblasti elastické deformace, ale v oblasti plastické. Výpočty jsem z důvodu usnadnění a zkrácení doby výpočtu prováděl na zjednodušeném čtvrtinovém 3D modelu.

#### 4.1.1 POSTUP TVORBY MKP ANALÝZY

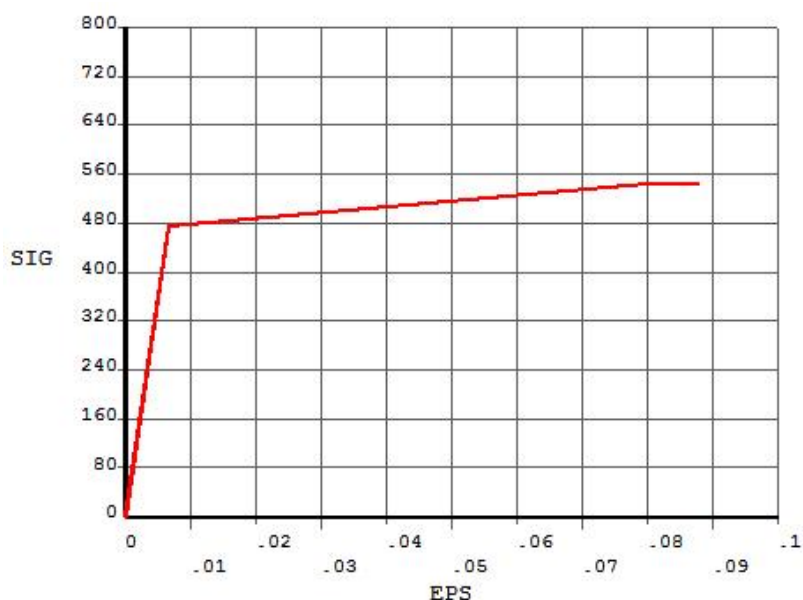
Napjatostní analýzu bezpečnostního plechu jsem provedl v programu ANSYS. Tento software využívá metody konečných prvků k určení průběhu vnitřních napětí.

#### DEFINICE MATERIÁLOVÝCH KONSTANT

V prvním kroku jsem nadefinoval potřebné materiálové vlastnosti. Pro přední rámovou přepážku z oceli dle ČSN 11 523 jsem definoval hodnoty  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$  a  $\mu = 0,3$ . Hodnoty modulu elasticity a Poissonovy konstanty pro plech z hliníkové slitiny jsem zvolil z Tab. 19, z níž jsem také definoval tahovou (tlakovou) závislost pro tento materiál, Obr. 26.



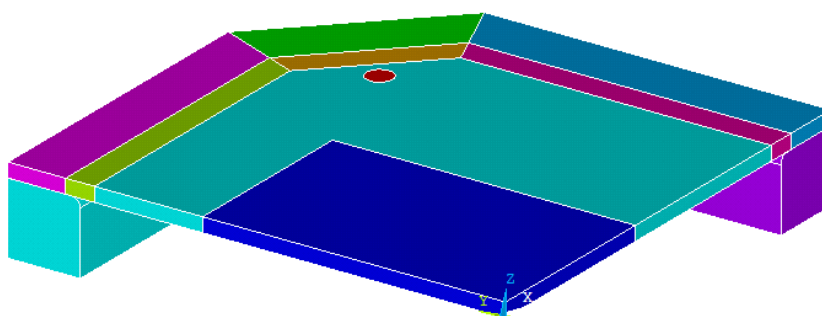
Nejedná se o přesný popis chování tohoto materiálu, ale pro naše účely bude toto přiblížení dostačující.



*Obr. 26 Definice tahové (tlakové) závislosti hliníkové slitiny EN AW-7075 T651 v prostředí ANSYS*

## TVORBA MODELU

Dále jsem vytvořil zjednodušený 3D model bezpečnostního plechu a část přední rámové přepážky doplněné o zaoblení pouze na vnitřní straně, Obr. 27. Pomocí tělesa v otvoru plechu jsem simuloval uchycení pomocí šroubu. Bezpečnostní plech je rozdělen na několik objemů - v prostoru nad bezpečnostní přepážkou (pro pozdější definování kontaktních ploch) a v místě styku plechu a deformačního členu (pro definici napětí). Celé zjednodušení poslouží také ke zjednodušení výpočtové sítě a zkrácení doby výpočtu.



Obr. 27 Zjednodušený 3D model bezpečnostního plechu a přední rámové přepážky (ANSYS)

### TVORBA SÍTĚ A DEFINICE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

K vytvoření sítě, Obr. 29, jsem použil prvky typu SOLID 95, Obr. 28. Přední rámová přepážka, úchytný šroub a část objemu v okolí otvorů pro úchytný šroub v bezpečnostním plechu jsem vysítval metodou sweep. Bezpečnostní ochranný plech je tvořen z několika objemů jednoduchých tvarů, proto jsem mohl použít metodu mapped. Mapovanou sítí docílím vytvoření menšího počtu prvků a zkrácení výpočtového času.

Vazebné podmínky s nulovými posuvy ve všech směrech jsem definoval pro spodní plochy přepážky a úchytného šroubu. Podmínkou symetrie zamezím posuvům a natočení v rovinách symetrie těles a mezi plochami přepážky a bezpečnostního plechu nadefinuji okrajové podmínky typu kontakt.

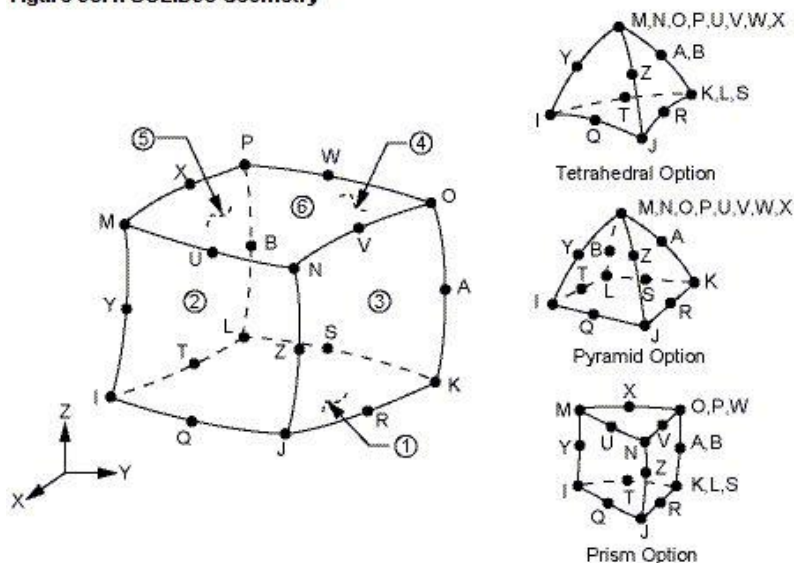
Z Tab. 17 předpokládám zatěžující sílu 72 879,0 N. Nicméně pro výpočet uvažuji sílu velikosti 80 000 N, čímž výpočet posunu na bezpečnou stranu. Tuto sílu pomocí rovnice (26) přepočtu na tlak, který aplikuji na plochu pod deformačním členem.

$$\sigma = \frac{F_{\max}^{\text{IA}}}{S^{\text{IA}}} = \frac{80\,000}{27\,300} = 2,93 \text{ MPa} \quad (26)$$

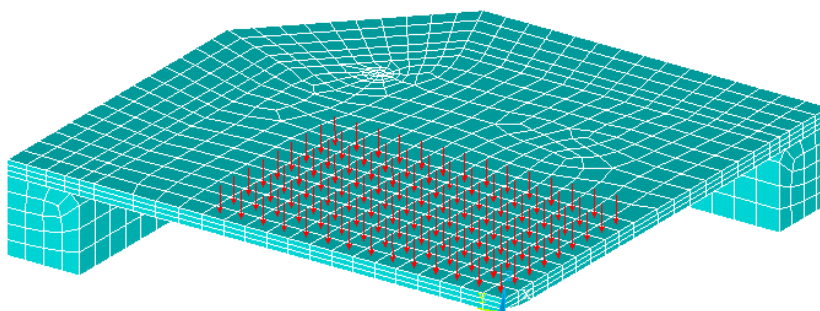
$F_{\max}^{\text{IA}}$  ... maximální síla působící na deformační člen [N]

$S^{\text{IA}}$  ... plocha deformačního členu o rozměrech 210 mm x 130 mm [mm<sup>2</sup>]

Figure 95.1: SOLID95 Geometry



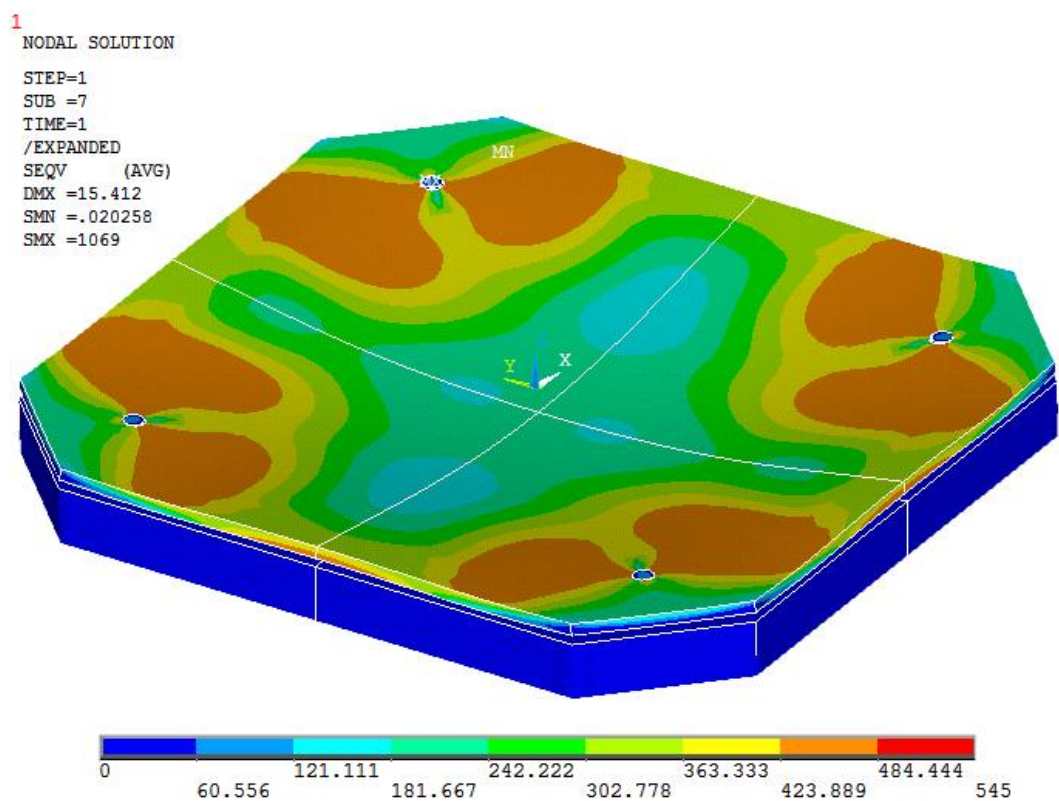
Obr. 28 Prvek typu SOLID 95 (ANSYS) [30]



Obr. 29 Vysíťování modelu bezpečnostního plechu a přední rámové přepážky (ANSYS)

#### 4.1.2 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Maximální hodnoty napětí dle von Mises se nachází pod hranicí pevnosti materiálu, Obr. 30. Avšak výsledné napětí v některých místech přesahuje mez kluzu hliníkové slitiny. V těchto místech lze tedy očekávat trvalou plastickou deformaci po odlehčení. Jelikož počítáme s hodnotou síly, která odpovídá přibližně 70% stlačení materiálu, není vyloučeno dosažení síly vyšší hodnoty při dalším stlačování, kde síla roste o mnoho rychleji. Této oblasti se ovšem budeme snažit vyvarovat dřívějším ukončením testu.



Obr. 30 Rozložení napětí na bezpečnostním plechu (ANSYS)



#### 4.1.3 VÝROBA BEZPEČNOSTNÍHO OCHRANNÉHO PLECHU

Po objednání a dodání materiálu na výrobu bezpečnostního ochranného plechu o požadovaných rozměrech 345 mm x 325 mm x 5 mm jsem vyrobil na plechu zkosení dle výkresové dokumentace tak, aby jeho rozměry byly totožné s vnějšími rozměry přední rámové přepážky. Dále jsem na plechu zhotovil čtyři otvory sloužící k uchycení na přední část rámu vozidla a také k testovacímu přípravku, Obr. 31.



*Obr. 31 Úprava bezpečnostního ochranného plechu*



## 5 PŘÍPRAVEK PRO TESTOVÁNÍ DEFORMAČNÍHO ČLENU

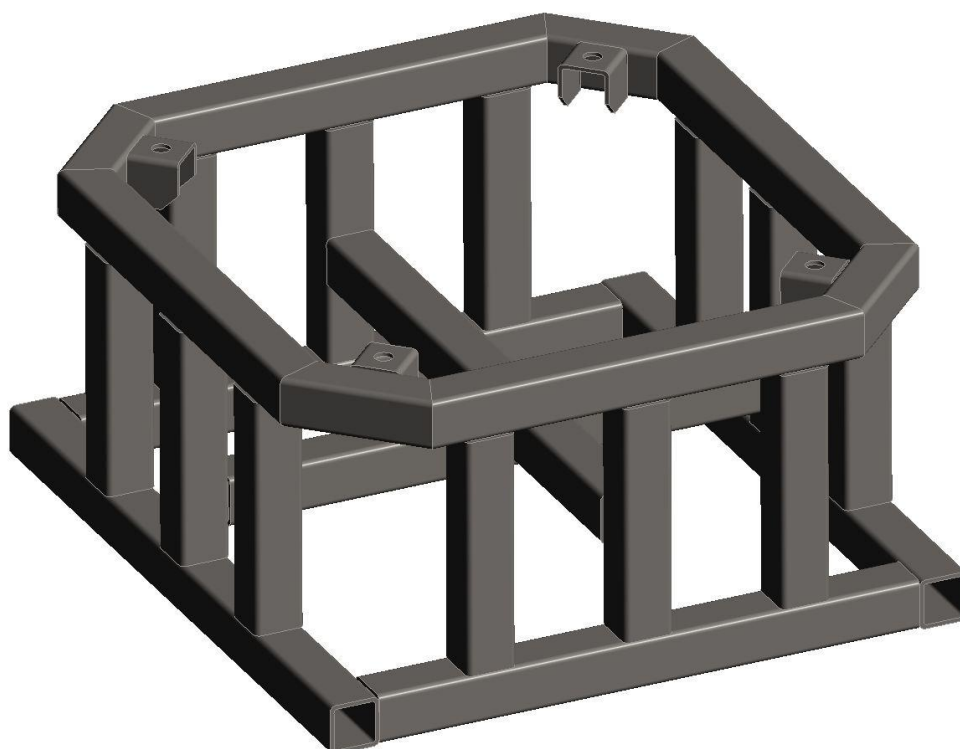
K ověření parametrů deformačního členu na zkušebním stroji je nutné vyrobit přípravek, pomocí něhož se simuluje připevnění k vozidlu. Dle pravidel by měl být způsob uchycení bezpečnostního plechu stejný s tím, který na vozidle bude použit. Posledním požadavkem je, aby byl zachován dostatečný prostor na průhyb plechu, tedy dle pravidel minimálně 50 mm.

### 5.1 NÁVRH PŘÍPRAVKU

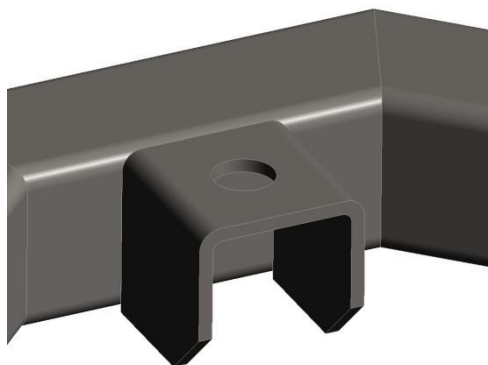
Při navrhování přípravku, Obr. 32, je nutné vycházet z rozměrů přední rámové přepážky vozidla. Ta je zhotovena ze čtvercových profilů 25 mm x 25 mm s tloušťkou stěny 2 mm a použitým materiálem je ocel s označením dle ČSN 11 523, jejíž vlastnosti jsou zaznamenány v Tab. 20. Vnější rozměry přepážky jsou 325 mm x 345 mm. Pro konstrukci celého přípravku jsem se rozhodl použít stejné čtvercové profily, a to i pro zhotovení úchytů plechu, Obr. 33. Tato konstrukce bude přivařena k několika svislým profilům, abychom zajistili dostatečný prostor pro průhyb plechu. To vše se poté přivaří k podstavci a pro zajištění stability, v případě vzniku bočních sil, celou konstrukci z vnitřní strany doplním o dva profily umístěné do kříže. Model testování deformačního členu vytvořený v programu Pro/ENGINEER (P3) jsem zobrazil na Obr. 34.

Tab. 20 Vlastnosti oceli ČSN 11 523[37]

	ČSN 11 523
$R_e$ [MPa]	333
$R_m$ [MPa]	520-628
$E$ [MPa]	210 000
$\mu$ [-]	0,3

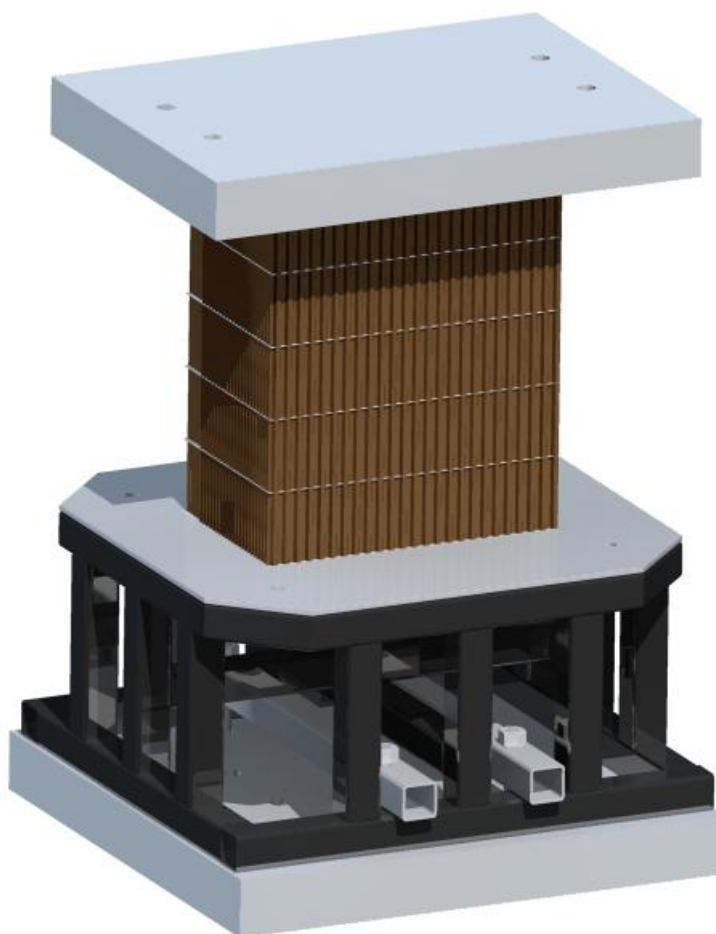


*Obr. 32 Model přípravku (Pro/ENGINEER)*



*Obr. 33 Model úchytu bezpečnostního plechu  
(Pro/ENGINEER)*



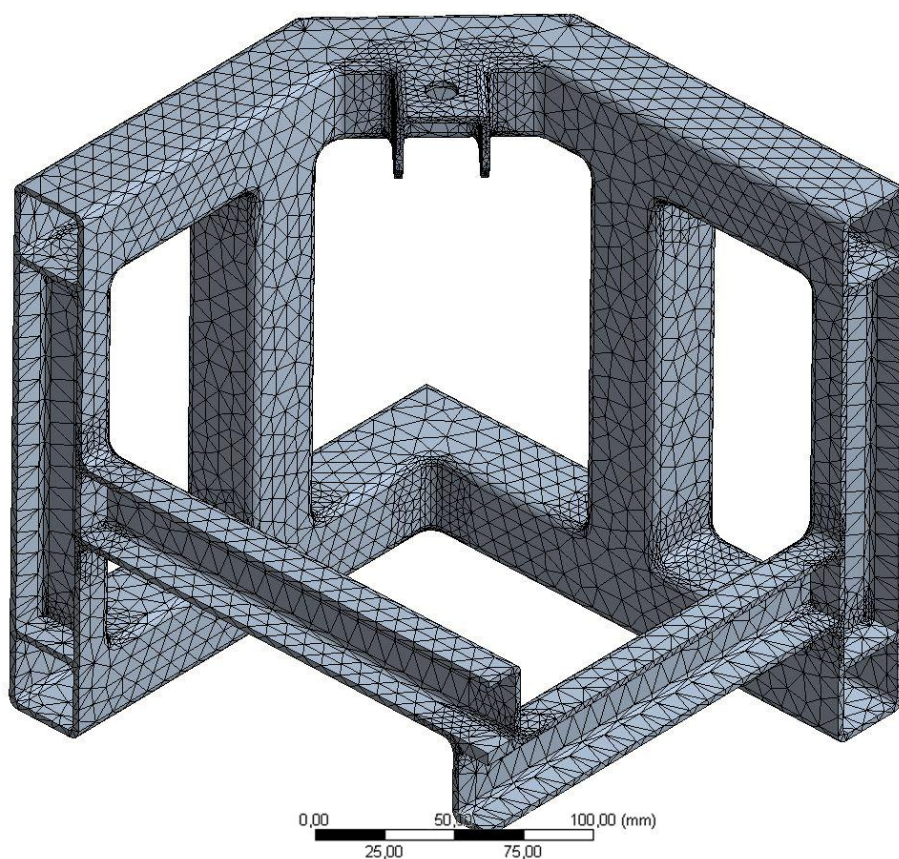


*Obr. 34 Model testování deformačního členu  
(Pro/ENGINEER)*

## 5.2 MKP ANALÝZA PŘÍPRAVKU

Napjatostní analýzu přípravku jsem opět z důvodu urychlení výpočtu provedl na čtvrtinovém 3D modelu, který jsem z programu ProENGINEER exportoval do prostředí softwaru ANSYS Workbench. Způsob zatížení jsem prováděl pomocí kontaktu desky umístěné na přípravek, na níž jsem aplikoval tlak odpovídající uvažované maximální síle. K vytvoření sítě, Obr. 35, jsem použil automatickou metodu se zjemněním na úchytech plechu a v místech svarových spojů.





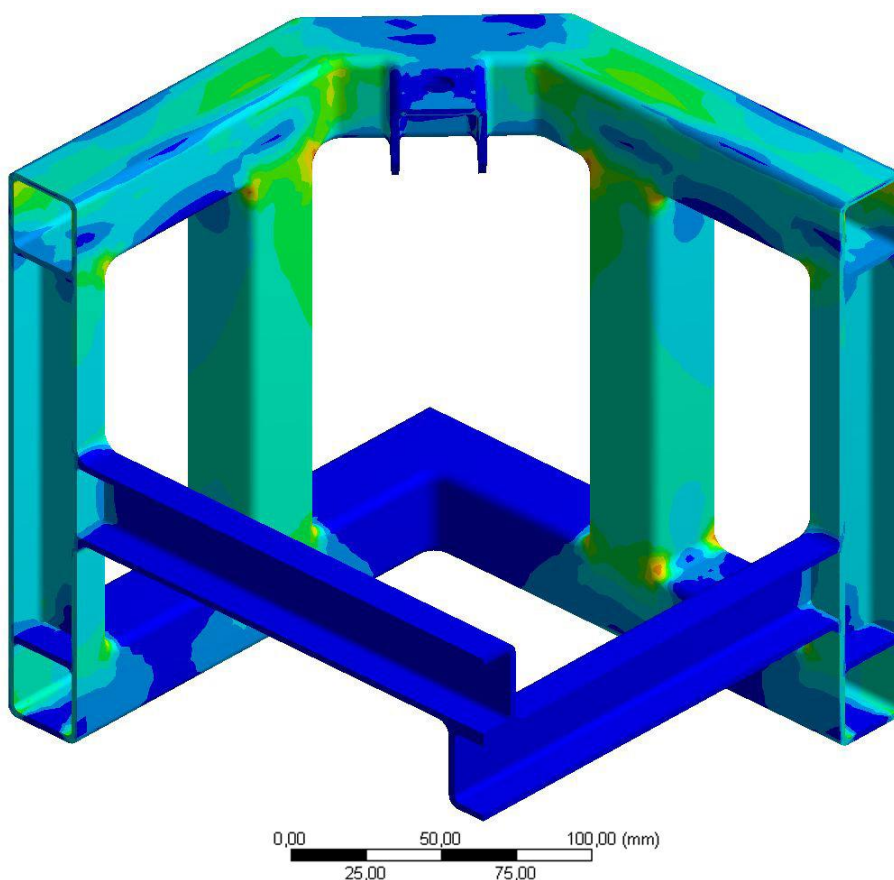
*Obr. 35 Síť modelu přípravku (ANSYS Workbench)*

#### **VÝSLEDEK NAPJATOSTNÍ ANALÝZY**

Podle očekávání můžeme na Obr. 36 vidět vysokou koncentraci napětí (632,81 MPa) v místech svarových spojů. V těchto místech mohou však být vlastnosti materiálu odlišné od použitých materiálových charakteristik a získaná napětí zde není možno na základě výpočtu hodnotit. Napětí v okolních místech se pohybuje pod hranicí meze kluzu, můžeme tedy konstatovat, že přípravek lze bezpečně použít pro testování deformačního členu

A: Static Structural (ANSYS)  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1

632,81 Max  
499,36  
417,71  
336,05  
288,05  
240,04  
192,04  
144,03  
96,026  
48,021  
0,015638 Min



Obr. 36 Rozložení napětí na přípravku (ANSYS Workbench)

### 5.3 VÝROBA PŘÍPRAVKU

Jelikož je celý přípravek vyroben ze stejného materiálu jako přední rámová přepážka, nechal jsem zhotovit nařezání čtvercových profilů na požadované délky a tvar u firmy zabývající se výrobou rámu vozidla, Obr. 37. Ze stejných profilů jsem poté zhotovil úchyty bezpečnostního plechu, Obr. 38, a nechal přípravek svařit, Obr. 39. Na závěr jsem na přípravek aplikoval antikorozi a povrchový nátěr.



*Obr. 37 Přichystané čtvercové profily 25 mm x 25 mm pro výrobu přípravku*



*Obr. 38 Zhotovení úchytů bezpečnostního plechu*



*Obr. 39 Svařování přípravku*



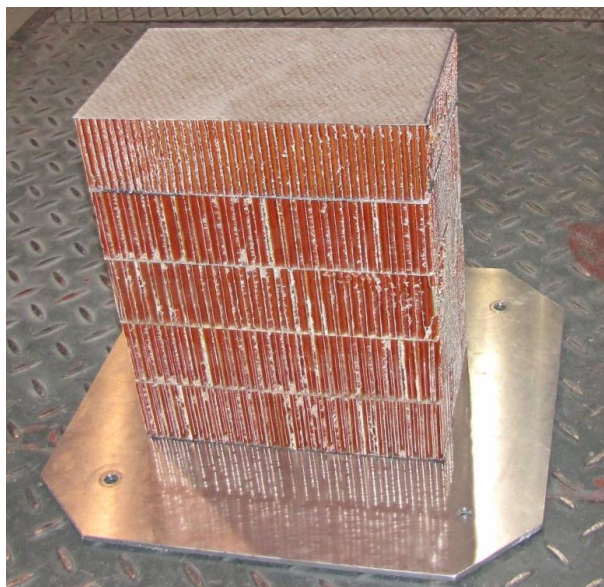


## 6 ZKOUŠENÍ DEFORMAČNÍHO ČLENU

Jako způsob testování deformačního členu jsem zvolil kvazi-statický test pomocí zařízení, jímž disponuje Fakulta strojního inženýrství. Konkrétně se jedná o zařízení Leteckého ústavu, s jehož pracovníky jsem celý test a přípravu mohl realizovat. Toto zařízení splňuje veškeré požadavky na provádění testu. Druhou možností by bylo využít zařízení Leteckého ústavu na provádění dynamického testu - padostroje. Bohužel jeho parametry již neodpovídají požadavkům soutěže na provádění testů, a proto volím první zmiňovaný způsob.

### 6.1 SESTAVENÍ DEFORMAČNÍHO ČLENU A UMÍSTĚNÍ NA PŘÍPRAVEK

K sestavení deformačního členu dle navržených rozměrů jsem musel nařezat voštinový panel na pět menších panelů, Obr. 25, které jsem k sobě spojil pomocí epoxidové pryskyřice EPOXY 1 200. Stejným způsobem jsem poté spojil panely s bezpečnostním ochranným plechem, Obr. 40. Epoxidovou pryskyřici bylo nutné nechat dostatečně dlouho vytvrdit, aby došlo k získání požadované pevnosti a ke spojení jednotlivých vrstev. Po vytvrdnutí jsem plech s panely spojil s přípravkem pomocí čtyř šroubů a provedl kvazi-statický test.

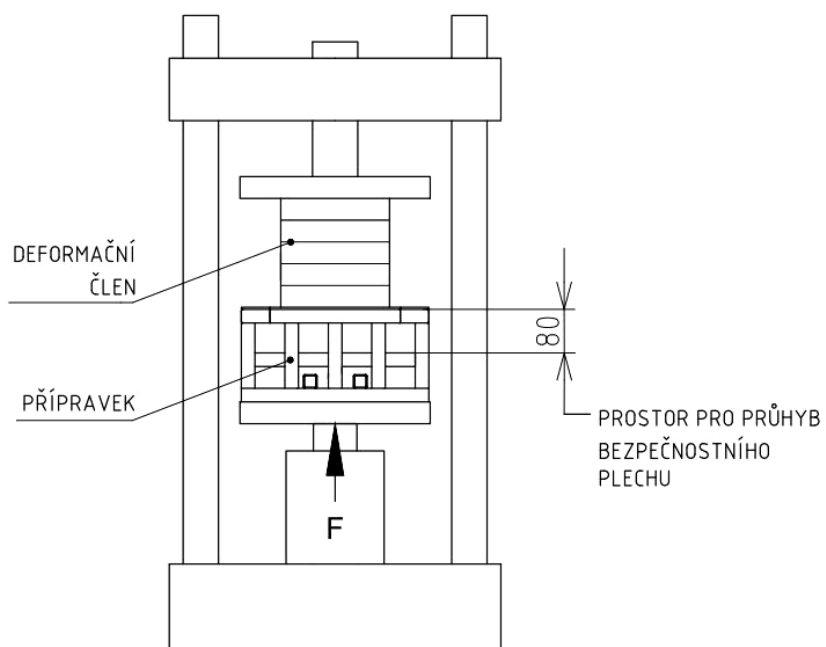


*Obr. 40 Spojení voštinových panelů a bezpečnostního plechu*

### 6.2 POPIS ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ A PROVEDENÍ KVAZI-STATICKE ZKOUŠKY

S pomocí pracovníků Leteckého ústavu a dalších členů týmu jsme připravili zkušební stroj na provedení testu. Příprava spočívala především v přesunutí příčnicku do takové polohy, abychom mohli provést test během pracovního zdvihu stroje. Poté jsme přípravek s deformačním členem připevnili pomocí dvou úchytných profilů ke spodní desce, která byla připevněna k hydraulickému pístu stroje. Píst přípravek s deformačním členem posouvá rychlostí 50 mm/min k vrchní desce připevněné nepohyblivě k příčnicku a deformuje se o ni. V průběhu testu je pomocí snímačů, které jsou součástí tohoto stroje, snímána působící síla a zdvih stroje. Obě veličiny jsou v závislosti na čase zaznamenávány do počítače.

Na Obr. 41 je znázorněno schéma testovací metody a na Obr. 42 reálná podoba kvazi-statické zkoušky.



*Obr. 41 Schéma kvazi-statické zkoušky*



*Obr. 42 Reálná podoba kvazi-statické zkoušky*

### 6.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ KVAZI-STATICKE ZKOUŠKY

Po provedení testu jsem naměřená data zpracoval obdobným způsobem, jako data ze zkušebních vzorků. Závislost síly na stlačení, Obr. 43, má předpokládaný průběh a můžeme zde vidět, jak dochází k deformaci jednotlivých vrstev panelů. Ke konci plastických deformací jednotlivých vrstev dochází k nárůstu síly, tedy dosažení meze pevnosti v tlaku u vrstvy následující (Obr. 43 - naměřená data jsem pro lepší přehlednost proložil křivkou). Za touto oblastí má charakteristika přibližně vodorovný průběh. Jedná se o deformační pevnost při borcení, pomocí níž jsme během testu mohli snadno určit hodnotu absorbované energie a kontrolovat tak, zda se blížíme k požadované hodnotě 7 350 J. Průběh testu jsme ukončili přibližně při absorbované energii 8 000 J, Obr. 45, abychom se vyhnuli zvýšenému namáhání bezpečnostního plechu a přípravku a předešli jejich destrukci.

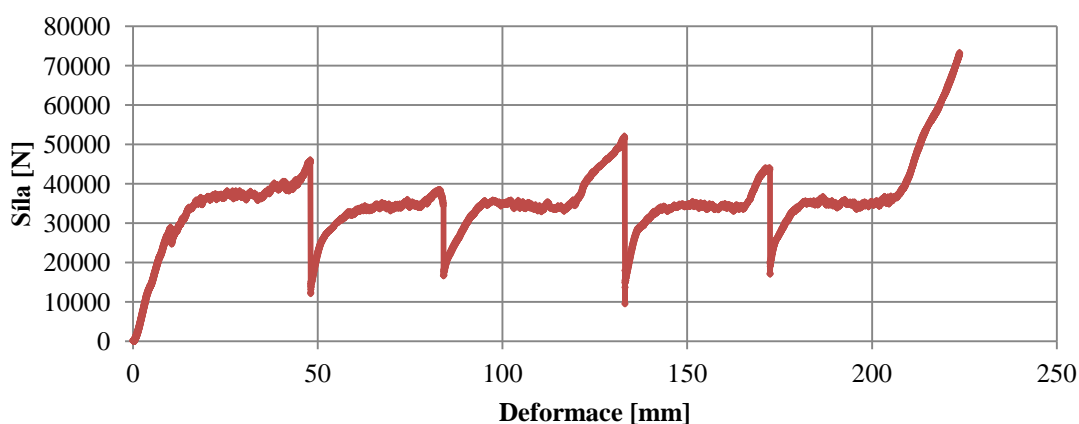
Zvláštností u průběhu síly na deformaci jsou rozdílné hodnoty síly potřebné k překonání pevnosti v tlaku, střední deformační síly u jednotlivých vrstev a rozdílné hodnoty maximálních stlačení panelů. Tyto jevy si vysvětluji tím, že při přípravě deformačního členu



mohlo dojít vlivem dělení materiálu k různému narušení buněčné struktury. Dále by se mohlo jednat o vliv rozdílných rozměrů jednotlivých desek a poslední řadě o nesymetrické umístění deformačního členu na bezpečnostní plech. Všechny tyto aspekty mohou být také podpořeny průhybem bezpečnostního plechu. Ten nám umožnil deformační člen stlačit na vyšší hodnotu, aniž by došlo k rychlému nárůstu sil na dovolené hodnoty a také přispěl k dosažení vyšší hodnoty absorbované energie.

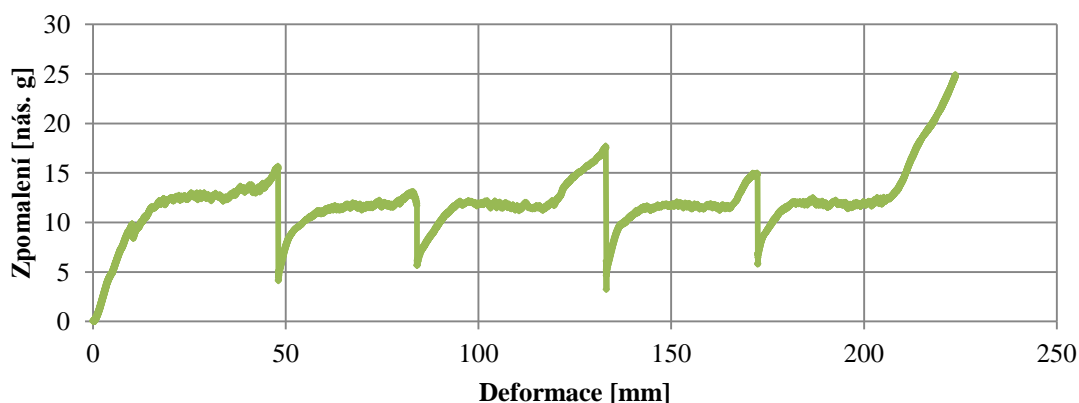
Pro informaci uvádím na Obr. 44 průběh zpomalení při stlačování deformačního členu, na Obr. 46 můžeme vidět deformační člen před provedením a po provedení kvazi-statické zkoušky a v Tab. 21 jsou zaznamenány naměřené a dopočtené hodnoty z tohoto testu.

## Síla - Deformace



Obr. 43 Průběh síly v závislosti na stlačení deformačního členu

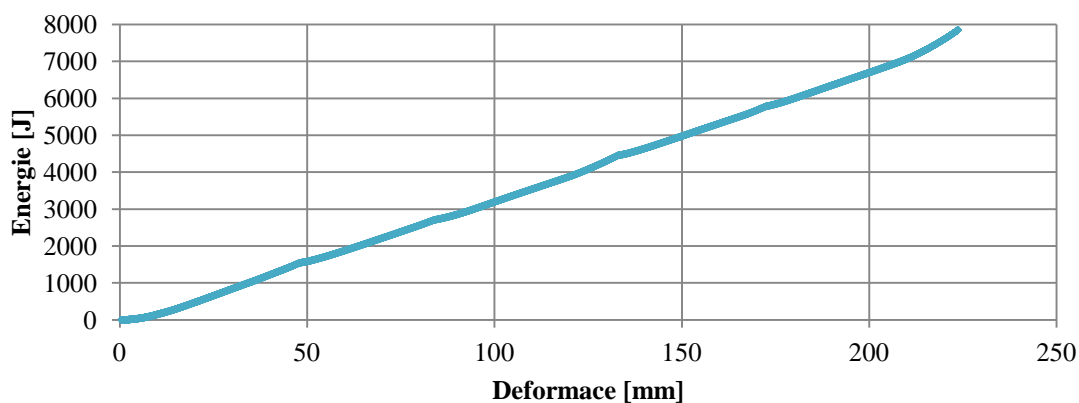
## Zpomalení - Deformace



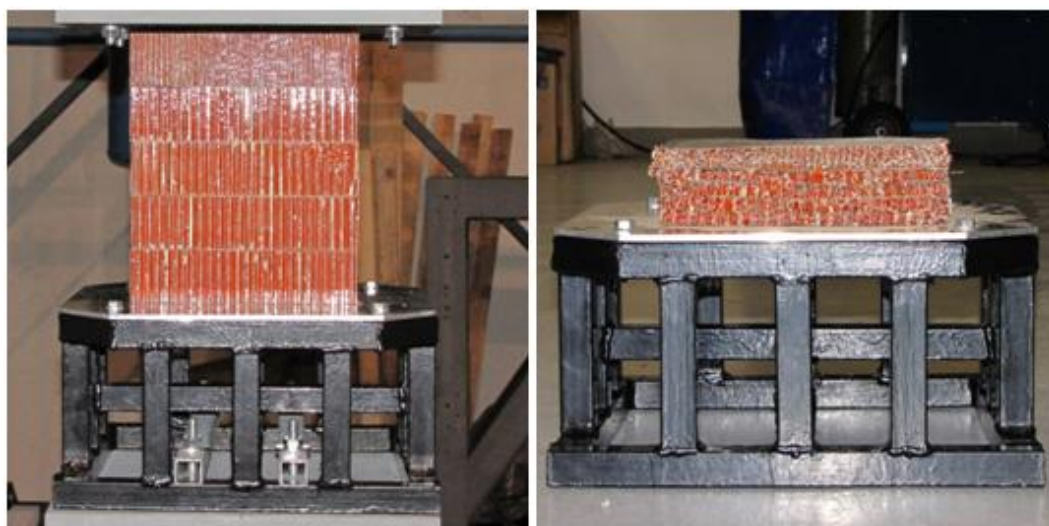
Obr. 44 Průběh zpomalení v závislosti na stlačení deformačního členu



## Energie - Deformace



Obr. 45 Průběh deformační energie v závislosti na stlačení členu



Obr. 46 Deformační člen před (vlevo) a po provedení testu (vpravo)

Tab. 21 Parametry deformačního členu Formule Student Dragon 2

Maximální síla působící na člen $F_{\max}^{\text{IA}}$ [N]	73 295,8
Průměrná síla působící na člen $F_{\text{avg}}^{\text{IA}}$ [N]	34 624,7
Deformace $x^{\text{IA}}$ [%]	89,4
Absorbovaná energie $E^{\text{IA}}$ [J]	7 854,1
Průměrné zpomalení $G_{\text{avg}}^{\text{IA}}$ [nás. g]	11,7
Maximální zpomalení $G_{\max}^{\text{IAmin}}$ [nás. g]	24,9



## 6.4 POROVNÁNÍ S POŽADOVANÝMI HODNOTAMI A S DEFORMAČNÍM ČLEMEM PŘEDCHOZÍ FORMULE STUDENT DRAGON 1

Z výsledků měření nyní můžeme konstatovat, že navržený deformační člen splňuje požadavky soutěže. Pro porovnání s požadovanými hodnotami dle pravidel soutěže s daty naměřenými u deformačního členu z hliníkové pěny předchozího vozidla Formule Student Dragon 1 uvádím v Tab. 22 nejdůležitější hodnoty, kterých jsme během testu docílili použitím aramidového voštinového panelu.

Důležitou hodnotou pro účast na soutěži je také úspora hmotnosti, Obr. 47. I při zvětšení rozměrů přední rámové přepážky z původních 325 mm x 235 mm na 345 mm x 325 mm a zvětšení tloušťky bezpečnostního plechu o 1 mm došlo k úspoře na hmotnosti o 1,5 kg.

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že ve srovnání s deformačním členem Formule Student Dragon 1 došlo k výraznému zlepšení hmotnostních i rozměrových<sup>6</sup> parametrů, viz Tab. 22 a Obr. 47.

Tab. 22 Porovnání parametrů výsledného deformačního členu pro Formuli Student Dragon 2[5][9]

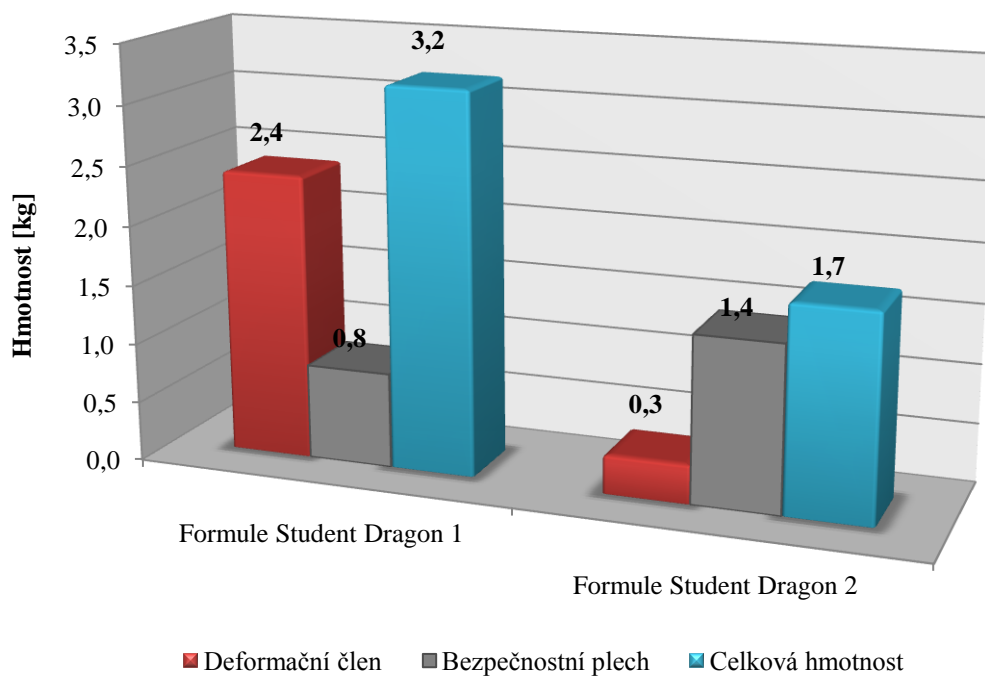
		Min. požadavky soutěže	Deformační člen Formule Student Dragon 1	Deformační člen Formule Student Dragon 2
Rozměry <sup>7</sup> [mm]	A	200	200	210
	B	100	140	130
	C	200	200	250
Pohlčená energie [J]		7 350	7 522,0	7 854,1
Maximální zpomalení G [nás. g]		40	37,1	24,9
Průměrné zpomalení G [nás. g]		20	19,8	11,7

<sup>6</sup> Pyramidový tvar s maximálními rozměry uvedenými v odstavci 2.3.

<sup>7</sup> Rozměry ve vzdálenosti 200 mm od bezpečnostního plechu.



## Porovnání hmotností



*Obr. 47 Srovnání hmotností s Formulí Student Dragon 1*



## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a zrealizovat deformační člen a jeho zkoušku pro vozidlo Formule Student Dragon 2. V první části práce se na základě porovnání vlastností jednotlivých materiálů, které připadají do úvahy pro výrobu deformačního členu, ukázala jako nejvhodnější hliníková nebo aramidová voština. Jelikož bylo cílem celého týmu postavit nové vozidlo s nižší hmotností, než je to stávající, byla pro návrh deformačního členu vybrána aramidová voština. Výhodou tohoto materiálu je velmi výhodný poměr vlastní hmotnosti a absorbované energie. Nevýhodou pak vysoká cena a delší dodací lhůta výrobce.

V další části mé práce jsem po dodání materiálu provedl deformační zkoušky na vzorcích, abych zjistil skutečné chování při zatěžování. Naměřená data se od předpokládaných hodnot mírně lišila. Tento rozdíl může být způsoben rozdílnými podmínkami při měření popř. chybami při přípravě vzorků. Chtěl bych podotknout, že při výběru vhodného typu voštiny lze poskytovaná data výrobcem použít pouze do určité míry. U těchto materiálů výrobce uvádí pevnost před vznikem porušením buněk. Pro nás je mnohem důležitější hodnotou deformační pevnost (odstavec 2.6.4), při níž dochází k největšímu množství absorbované energie. Bohužel tuto hodnotu výrobce neuvádí a je poměrně těžké ji získat. Proto bych chtěl apelovat na budoucí týmy, aby se před koupí materiálů pokusily získat přímo od výrobce skutečné hodnoty s průběhem zatěžování nebo alespoň vzorky materiálu pro zjištění jeho chování. Tímto lze předejít nepříjemnostem (vysoké hodnoty zpomalení popř. nízká hodnota absorbované energie) po zakoupení nevyhovujícího materiálu, které se bohužel prodávají v tabulích velkých rozměrů, jejichž cena poté může významně ovlivnit rozpočet týmu.

Při navrhování rozměrů bylo také důležité neustále komunikovat s designérem kapotáže. Vyhnuli jsme se tak problému, jaký nastal u předchozí generace vozidla Formule Student Dragon 1, kdy bylo nutné upravit deformační člen dle prostoru pod kapotáží. Pouze vzájemnou komunikací mezi členy týmu se podařilo nalézt takové rozměry, které splní požadavky soutěže a přitom nedojde ke kolizi s dalšími částmi vozu.

Analýzou napjatosti bezpečnostního ochranného plechu a přípravku byla ověřena vhodnost k provedení kvazi-statické zkoušky. U bezpečnostního plechu bylo možno očekávat trvalé plastické deformace po odlehčení, ale stejně jako u přípravku zde nebyl předpoklad jejich porušení. Zkoušky vzorků ukázaly, že deformační člen bylo možno navrhnout o rozměrech 210 mm x 130 mm x 250 mm. Při jeho testu bylo dosaženo následujících hodnot:

- Absorbovaná energie: 7 854,1 J
- Průměrné zpomalení: 11,7 nás. g
- Maximální zpomalení: 24,9 nás.g

Tímto byla dodržena požadovaná kritéria na požadavky deformačního členu a je tedy možno jej použít na vozidle Formule Student. Byla také potvrzena trvalá deformace bezpečnostního plechu. Hodnota trvalého průhybu po provedení testu dosáhla 5,2 mm, čímž taktéž splňuje požadavek soutěže na maximální trvalý průhyb po odlehčení 25,1 mm.

Do budoucna by bylo vhodné z důvodu vyššího bodového hodnocení na soutěži, popř. z důvodu nutnosti na účasti v soutěži v jiných zemích (Německo), se zaměřit na provedení dynamické zkoušky, na kombinaci různých materiálů popř. na simulaci pomocí MKP.



Práce na projektu Formule Student, a tedy i vypracování mé diplomové práce, mě obohatila cennými zkušenostmi z praxe a naučila nejen týmové spolupráci, ale také pracovat ve stresu a řešit úkoly v daném termínu.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] NOVÁ, Iva a Jiří MACHUTA. Výrobky z hliníkové pěny. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 18.12.2007 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny.html>
- [2] Alporas®: ALUMINIUM FOAM. *Gleich: Aluminium* [online]. © 2012 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: [http://www.gleich.de/files/datenblatt\\_alporas\\_1.pdf](http://www.gleich.de/files/datenblatt_alporas_1.pdf)
- [3] *ERG: AEROSPACE CORPORATION* [online]. © 2011 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.ergaerospace.com/>
- [4] AlCarbon Alporas® - AC black both sided ground. *Stylepark* [online]. ©2001–2012 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.stylepark.com/en/alcarbon/alporas-ac-black-both-sided-ground>
- [5] MARTINEC, Pavel. *NÁVRH BEZPEČNOSTNÍCH PRVKŮ VOZIDLA FORMULE STUDENT*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Ramík.
- [6] MANGIPUDI, K.R. a P.R. ONCK. *Fracture of metal foams*. The Netherlands, 2011, 31 s. Dostupné z: <http://www.ae.utexas.edu/IUTAM2011/Onck.pdf>
- [7] *Formula Student* [online]. ©2012 [cit. 2012-01-22]. Dostupné z: <http://www.formulastudent.com/>
- [8] *TU Brno Racing* [online]. 2010 [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://www.tubnoracing.cz/>
- [9] *2012 Formula SAE® Rules: FORMULA SAE*. 2011, 131 s. Dostupné z: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2012fsaerules.pdf>
- [10] ČERMÁK, Libor a Rudolf HLAVIČKA. *Numerické metody*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3071-0.
- [11] IMPAXX™. *DOW: Automotive systems* [online]. 2012 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: [http://www.dowautomotive.com/capabilities/product\\_family/impaxx.htm](http://www.dowautomotive.com/capabilities/product_family/impaxx.htm)
- [12] WITTEMAN, Dr. Ir. a M.T.J. FONTEYN. *Formula student: Crash Safety*. 2006, 23 s. Dostupné z: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/6589.pdf>
- [13] *ROHACELL®* [online]. [2012] [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.rohacell.com/>
- [14] *HexWeb™: Honeycomb Attributes and Properties*. 1999, 38 s. Dostupné z: [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Attributes\\_and\\_Properties.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf)
- [15] URÍK, Tomáš. *LETECKÝ ÚSTAV VUT V BRNĚ. ZKOUŠKY VOŠTINOVÝCH JADER V TLAKU*. Doc. Ing. Josef Klement CSc. Brno, 6.12.2005, 10 s. Číslo zprávy: LU 67/2005.



- [16] 5M, s.r.o. *Technický list: HLINÍKOVÉ VOŠTINOVÉ SENDVIČE KONSTRUKČNÍ*. 2010, 2 s. Verze: 01.12.2010.
- [17] AKTAY, Levent, Alastair F. JOHNSON a KROPLIN. *Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour*. 6.3.2007, 15 s. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794407001087>
- [18] HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o. *Technický list: NOMEX HONEYCOMBS CORMASTER C1*. 2012, 2 s.
- [19] Padostroj IMATEK IM10T-30HV. *COMTES FHT a.s.* [online]. © 2011 [cit. 2011-12-21]. Dostupné z: <http://www.comtesfht.cz/aktuality/padostroj-imatek-im10t-30hv/>
- [20] *Formula SAE* [online]. [2012] [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.fsaeonline.com/>
- [21] Bunkové telesá – Penové materiály II: Výroba bunkových telies. GOGA, Vladimír. *Posterius: Portál pre odborné publikovanie ISSN 1338-0087* [online]. ročník 3, číslo 7. 19.7.2010 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.posterius.sk/?p=7871>
- [22] *Nauka o materiálu: Přednáška č.13 – Polymery*. [2012], 30 s. Dostupné z: [http://www.339.vsb.cz/nauka\\_o\\_materialu/Slide13\\_Polymery.pdf](http://www.339.vsb.cz/nauka_o_materialu/Slide13_Polymery.pdf)
- [23] FABRIGER, Daniel. *Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur Vakuovou infuzí pod pružnou folií*. Zlín, 2011. Dostupné z: <https://portal.utb.cz/stag?urlid=prohlizeni-prace-detail&praceIdno=14177>. Diplomová práce. universita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.
- [24] *DIAB* [online]. [2012] [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.diabgroup.com/>
- [25] FOAM MATERIALS. *Favonius* [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.favonius.com/soaring/foams/foams.htm>
- [26] AIREX® foams. *AIREX polymer foams* [online]. ©1998-2011 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://www.corematerials.3acomposites.com/airex-foams.html>
- [27] *ROHACELL: EVONIK INDUSTRIES COMPOSIT MATHATERIALS*. 2009. Dostupné z: [http://www.relicom.ru/images/upload/ru/1589/Rohacell\\_11.jpg](http://www.relicom.ru/images/upload/ru/1589/Rohacell_11.jpg)
- [28] POLYSTYRENE INSULATION. *ISOVER: SAINT-GOBAIN* [online]. ©2008 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.isover.com/Our-solutions/Insulation-materials/Polystyrene-insulation>
- [29] How is STYROFOAM™ Brand Extruded Polystyrene Foam Insulation manufactured?. *DOW: Building solutions Answer Center* [online]. 10.3.2011 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: [http://dow-styrofoam.custhelp.com/app/answers/detail/a\\_id/738/kw/manufactur%20impaxx](http://dow-styrofoam.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/738/kw/manufactur%20impaxx)
- [30] Release 12.0 Documentation for ANSYS, ANSYS Inc., Canonsburg, USA 2010



- [31] KOŘÍNEK, Zdeněk. *KOMPOZITY: 2. Vlákná*. [2012], 66 s. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [32] *CEL COMPONENTS: Aluminium and thermoplastic honeycombs, laminates, sandwich panels* [online]. [2012] [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.honeycombpanels.eu/>
- [33] EC: Download/Support. *EC: Euro-Composites* [online]. ©2010 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.euro-composites.com/en/download/Seiten/default.html>
- [34] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK, Jan VRBKA a Jiří BURŠA. *Mechanika těles: Pružnost a pevnost I*. třetí přepracované vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, březen 2004. ISBN 80-214-2592-X.
- [35] *ALCOM ALVAL ALUMINIUM: PLECHY, DESKY EN AW-7075*. [2011], 2 s. Dostupné z: [http://www.hlinik.cz/upload/file/Final%20pdf/2-7-7075-PLECHY-DESKY%20-%20final\\_.pdf](http://www.hlinik.cz/upload/file/Final%20pdf/2-7-7075-PLECHY-DESKY%20-%20final_.pdf)
- [36] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. vyd. Brno/Praha: VUTIUM/PROMETHEUS, 2000, 1198 s. ISBN 8021418699.
- [37] LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. třetí doplněné vydání. Praha: Scientia, spol. s.r.o., 2000. ISBN 80-7183-164-6.
- [38] *Hlinikova pena: / Alporas, Alu-foam , Alu-Schaum, Alu-Espuma /*. [2012], 6 s. Dostupné z: [http://www.hlinik.sk/pdf/hli\\_pena.pdf](http://www.hlinik.sk/pdf/hli_pena.pdf)
- [39] *Sandwich-Wabenkerne: FE-Simulation zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften*. 2009, 6 s. Dostupné z: [http://www.heimbs-online.de/Heimbs\\_2009\\_LightweightDesign.pdf](http://www.heimbs-online.de/Heimbs_2009_LightweightDesign.pdf)
- [40] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu 2*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.





## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a$	[m]	délka vzorku
$A$	[m]	délka členu
$A_{50\text{mm}}$	[%]	tažnost materiálu
$b$	[m]	šířka vzorku
$B$	[m]	šířka členu
$c$	[m]	výška vzorku
$C$	[m]	výška členu
$E$	[MPa]	modul elasticity
$E^{\text{IA}}$	[J]	energie absorbovaná deformačním členem
$E^{\text{IAmin}}$	[J]	energie absorbovaná deformačním členem minimálních rozměrů
$E^{\text{vzorek}}$	[J]	energie absorbovaná zkušebním vzorkem
$F$	[N]	síla působící na těleso
$F_{\text{avg}}^{\text{IA}}$	[N]	průměrná síla působící na deformační člen
$F_{\text{avg}}^{\text{IAmin}}$	[N]	průměrná síla působící na deformační člen minimálních rozměrů
$F_{\text{avg}}^{\text{vzorek}}$	[N]	průměrná síla působící na vzorek
$F^{\text{IA}}$	[N]	síla působící na deformační člen
$F_{\text{max}}^{\text{IA}}$	[N]	maximální síla působící na deformační člen
$F_{\text{max}}^{\text{IAmin}}$	[N]	maximální síla působící na deformační člen minimálních rozměrů
$F_{\text{max}}^{\text{vzorek}}$	[N]	maximální síla působící na zkušební vzorek
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	tíhové zrychlení
$G$	[nás. g]	hodnota zpomalení dle pravidel soutěže
$G_{\text{avg}}^{\text{IA}}$	[nás. g]	průměrná hodnota zpomalení působící na deformační člen
$G_{\text{avg}}^{\text{IAmin}}$	[nás. g]	průměrné zpomalení působící na def. člen minimálních rozměrů
$G_{\text{avg}}^{\text{vzorek}}$	[nás. g]	průměrná hodnota zpomalení působící na zkušební vzorek
$G^{\text{IA}}$	[nás. g]	zpomalení působící na deformační člen
$G_{\text{max}}^{\text{IAmin}}$	[nás. g]	max. zpomalení působící na deformační člen minimálních rozměrů
$G_{\text{max}}^{\text{vzorek}}$	[nás. g]	maximální hodnota zpomalení působící na zkušební vzorek
HBW	[-]	tvrdost podle Brinella
$m^{\text{IA}}$	[kg]	hmotnost deformačního členu



$m^{\text{vozidla}}$	[kg]	hmotnost vozidla dle pravidel soutěže
$m^{\text{vzorek}}$	[kg]	hmotnost objektu působící na vzorek
$Q_M(f)$	[-]	obdélníková kvadrurní formule pro výpočet integrálu
$n$	[-]	počet záznamů
$P_0$	[-]	polynom stupně 0
$R_e$	[MPa]	mez kluzu materiálu
$R_m$	[MPa]	mez pevnosti materiálu
$R_{P0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
$S^{IA}$	[m <sup>2</sup> ]	plocha deformačního členu
$S^{IAmin}$	[m <sup>2</sup> ]	plocha deformačního členu minimálních rozměrů
$S^{\text{vzorek}}$	[m <sup>2</sup> ]	plocha vzorku
$V^{IA}$	[m <sup>3</sup> ]	objem deformačního členu
$V^{IAmin}$	[m <sup>3</sup> ]	objem deformačního členu minimálních rozměrů
$V^{\text{vzorek}}$	[m <sup>3</sup> ]	objem vzorku
$W$	[J]	práce
$x^{IA}$	[%]	stlačení deformačního členu
$x^{IAmin}$	[%]	stlačení deformačního členu minimálních rozměrů
$x^{\text{vzorek}}$	[%]	stlačení vzorku
$x_f$	[m]	poloha na konci děje
$x_i$	[m]	poloha na počátku děje
$\mu$	[-]	Poissonova konstanta
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota materiálu
$\sigma$	[MPa]	napětí
$\langle a_Q, b_Q \rangle$	[m]	interval uvažovaných hodnot (mez integrálu)



## SEZNAM PŘÍLOH

- |    |   |
|----|---|
| P1 | porovnání materiálů   |
| P2 | naměřená a vypočtená data ze zkušebních vzorků a deformačního členu |
| P3 | 3D model deformačního členu a přípravku                             |